

Periodical Part, Published Version

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)

Einfluss der Randbedingungen auf die Abflussleistung unterströmter Wehrverschlüsse

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102932>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (1982): Einfluss der Randbedingungen auf die Abflussleistung unterströmter Wehrverschlüsse. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 51).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Mitteilungsblatt
der
Bundesanstalt für Wasserbau

Nr. 51

KARLSRUHE · NOVEMBER · 1982

ISSN 0572 - 5801

Mitteilungsblatt

der

Bundesanstalt für Wasserbau

Nr. 51

KARLSRUHE · NOVEMBER · 1982

ISSN 0572 - 5801

I N H A L T

Seite

P u l i n a / V o i g t

EINFLUSS DER RANDBEDINGUNGEN AUF DIE ABFLUSS-
LEISTUNG UNTERSTRÖMTER WEHRVERSCHLÜSSE

Influence of the geometry of the structure on
the discharge beneath underflow gates

1 - 18

K e m n i t z

BEITRAG ZUR VERRINGERUNG DER QUERGESCHWINDIGKEITEN
IM UNTEREN SCHLEUSENVORHAFEN EINER STAUSTUFE

On the reduction of cross velocities in a lower
lock approach

19 - 30

H e i n / K l e i n

UNTERSUCHUNG ÜBER DEN TEMPERATUREINFLUSS AUF DAS
KORROSIONSVORHALTEN VON UNGESCHÜTZTEM STAHL
IM EMDER HAFENWASSER

Study in the influence of temperature on the
Corrosion of unprotected steel within
EMDEN harbour water

31 - 58

- Wiedergabe der Aufsätze mit Quellenangabe gestattet -
Das Mitteilungsblatt erscheint in unregelmäßiger Folge
im Eigenverlag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW),
Kußmaulstraße 17, 7500 Karlsruhe 21

Dipl.-Ing. Bernd Pulina
und
Ing. (grad.) Axel Voigt

EINFLUSS DER RANDBEDINGUNGEN AUF DIE ABFLUSSLEISTUNG UNTERSTRÖMTER WEHRVER- SCHLÜSSE

Influence of the geometry of the structure on the discharge beneath underflow
gates

Inhaltsangabe

Der Einfluß der geometrischen Randbedingungen des Gesamtsystems auf die Abflußleistung der Wehranlage wird anhand von Untersuchungsergebnissen gezeigt, die in der BAW für die Staustufen am Rhein, der Fulda und der Saar in den letzten Jahren gewonnen wurden. Durch die Ausflußzahl α konnten die Einflüsse der Sohlenform unter dem Verschluß, der Stauwandkrümmung sowie auch der Neigung der Stauwand zur Horizontalen herausgestellt werden. Für häufig vorkommende Betriebszustände innerhalb der Parametergröße $1,3 < \frac{h_o-p}{h_a} < 4,5$ werden funktionale Beziehungen zwischen der Ausflußzahl α und dem Parameter $\frac{h_o-p}{h_a}$ aufgestellt. Die Untersuchungen zeigten, daß die Ausflußzahlen, die unter idealisierten Randbedingungen bestimmt werden, von den Ausflußzahlen der praktischen Verhältnisse bis zu 30% abweichen können.

Summary

The influence of the geometrical circumstances of the whole system of the underflow gates on the discharge capacity is demonstrated by the investigation results which have been gained over the last years through the hydraulic models carried out by the Federal Institute for Waterways Engineering (BAW) for the flood gates of river dams on the Rhein, the Fulda and the Saar. It has been proved that the effect of the floorshape beneath the gate, the inclination of the dam wall to the horizontal level δ and the dam wall curvature is coefficient to the discharge of free flow. Where work conditions in the range of $1,3 < \frac{h_o-p}{h_a} < 4,5$ frequently occur functional correlations were established between the coefficient of discharge of free flow α and the expression $\frac{h_o-p}{h_a}$. The investigations, performed under ideal conditions, have shown that the coefficient of discharge of free flow α could differ up to as much as 30 % from those attained under practical situations.

I N H A L T	Seite
1 Das Problem der Abflußermittlung bei unterströmten Wehrverschlüssen	3
2 Die abflußbestimmenden Randbedingungen	3
3 Parametergrößen in der Praxis - Beispiele -	5
4 Die Anordnung und Aufgabe der Untersuchung	7
5 Die Abflußleistung der BAUWERKE	8
5.1 Neigung und Krümmung der Stauwand	9
5.2 Sohlenform unter dem Verschuß	11
5.3 Dimensionslose Größe h_0/a bzw. $(h_0-p)/a$	12
5.4 Unterwasserspiegellage	15
5.5 Räumliche Anströmungsverluste	16
6 Zusammenfassung	18
7 Schrifttum	18

1 Das Problem der Abflußermittlung bei unterströmten Verschlüssen

Der Segmentverschluß wird wegen den hervorragenden betrieblichen und hydraulischen Eigenschaften an Stauanlagen der Wasserstraßen in vielfacher Anwendung ausgeführt.

Der rechnerischen Bestimmung der Abflußleistung ist dabei schon im Entwurfsstadium eine große Bedeutung beizumessen, weil damit die Kosten und der Raumbedarf der Anlage in Beziehung stehen. Die Abflußleistung eines unterströmten Verschlusses beliebiger Bauart wird praktisch aus der nachstehenden Gleichung 1 bestimmt.

$$Q = K \cdot \alpha \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2gh_0} \quad (1)$$

mit

- h_0 - Druckhöhe des vollkommenen Abflusses
- a - Lotrechte Öffnungshöhe
- b - Verschlußkörperbreite
- α - Ausflußzahl
- K - Koeffizient für den Unterwassereinfluß.

Mit der Ausflußzahl α müssen dabei die Einflüsse der Strahleinschnürung der Reibung und der Randgeometrie des Bauwerks erfaßt werden. Durch den Beiwert K wird die Reduzierung der wirksamen Druckhöhe h_0 infolge des Einflusses des Unterwassers h_u berücksichtigt.

Die in Handbüchern angegebenen Ausflußzahlen α basieren auf starr idealisierten Randbedingungen und erfassen daher die tatsächlichen Verhältnisse nur unzureichend. Für den Staustufenbau an der Fulda, dem Rhein und der Saar wurden in der Bundesanstalt für Wasserbau umfangreiche Modellversuche durchgeführt. Die Versuche zeigten, daß die Abflußleistung nicht nur durch die geometrischen Verschlußparameter vielmehr auch durch die Sohlenform unterhalb des Verschlusses stark verändert wird. Der Einfluß der geometrischen Randbedingungen des Gesamtsystems auf die Abflußleistung ist dabei unter separierter Rückstauwirkung des Unterwasserstandes gewonnen worden. Durch die vorgegebenen Projektmaße war der Wertbereich der untersuchten Einflußgrößen leider begrenzt. Die nachstehenden Diagramme dürften aber größtenteils die unterschiedlichen Randbedingungen erfassen, die als Entwurfsgrundlagen für Stauregelungsanlagen an Binnenwasserstraßen zu berücksichtigen sind. Zweifelsfrei wird man auch in der Zukunft auf Modellversuche nicht ganz verzichten können. Die hier wiedergegebenen Untersuchungsergebnisse sollen lediglich die projektbezogenen Voruntersuchungen erleichtern und die erforderlichen Vorkehrungen erkennen helfen.

2 Die abflußbestimmenden Randbedingungen

Für die Bestimmung der Abflußleistung unter einem Verschluß lassen sich folgende Variablen heranziehen:

- a) Parameter, die die Betriebsbedingungen beschreiben,
- b) Größen, welche die gesamte Geometrie des Bauwerks charakterisieren.

Mit der für die Praxis zulässigen Vernachlässigung der Reynolds-Zahl sind zu Pkt. a im einzelnen nachstehende Größen zu nennen:

- h_o - Oberwassertiefe
- h_u - Unterwassertiefe
- a - Lotrechte Öffnungshöhe

Für die Beschreibung der komplizierten Geometrie des Bauwerks sind grundsätzlich nachstehende Parameter erforderlich:

- δ - Den Neigungswinkel zwischen der Stauwand bzw. Anströmungshaut und der Horizontalen im Oberwasser,
- r - Die Stauwandkrümmung,
- p - Die Sohlenform unterhalb des Verschlusses (Wehrschwellerhöhe).
- b/b_w - Das Verhältnis der durchströmten Öffnungsbreite b zur gesamten Wehr- bzw. Wehrbuchtweite b_w ,
- θ - Der Neigungswinkel der Wehrschwelle.

Im Endergebnis kann der Abfluß pro Breitereinheit (Erguß) q als Funktion der vorstehenden Veränderlichen zusammengefaßt werden.

$$q = f \left(\frac{h_o - p}{a} ; \frac{\delta}{\theta} ; \frac{h_u}{a} ; \frac{b}{b_w} ; \frac{r}{a} \right) \quad (2)$$

Bei einer vorgegebenen Wehrkonfiguration wird das komplexe Zusammenwirken der genannten Größen durch den Wert der Ausflußzahl α erfaßt und beschrieben.

In Abhängigkeit von der Sohlenform sind unter einem Wehrverschluß beliebiger Bauart die in Bild 1 skizzierten Abflußbilder zu unterscheiden.

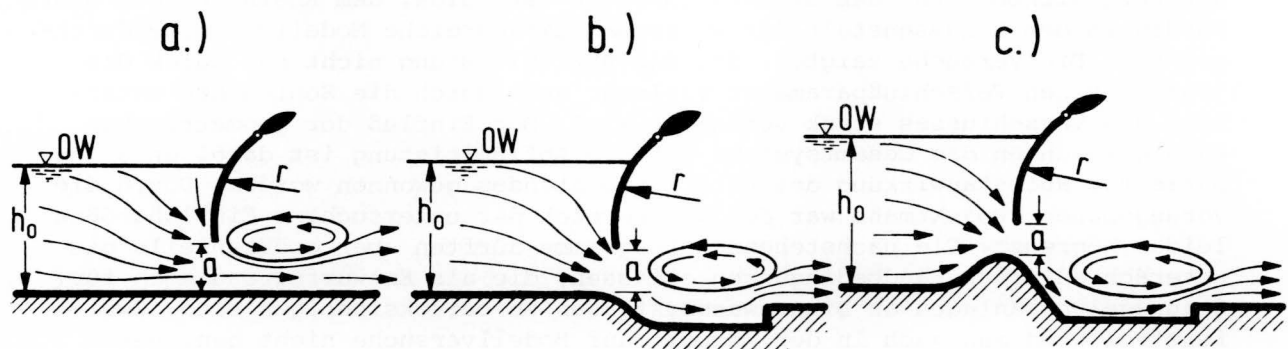


Bild 1: Schematische Darstellung der Abflußvorgänge bei verschiedenen Sohlenformen im Bereich unter dem Verschuß

Für die mit dem Buchstaben a bezeichnete Situation ist die horizontale Sohlengestaltung unter dem Verschuß bis hin zur "Vena contracta", als hervorstechende Eigenschaft zu beachten. Für diese Randbedingungen sind Ausflußzahlen α aus früheren Modellversuchen in der Fachliteratur verfügbar. Eine gute Übersicht kann z.B. hierfür die von Toch, Mises und Weisbach aufgestellte Beziehung vermitteln (Bild 2). Die Ausflußzahl α ist

mit dem Einschnürungsbeiwert μ über die Gleichung zusammengezogen

$$\alpha = \frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu \cdot a / h_0}} \quad (3)$$

Die in Bild 1 a dargestellte Konfiguration wird jedoch an den Wehranlagen der Wasserstraßen keine Anwendung finden. Die in der Praxis weit verbreitete Randgeometrie ist den Bildern 1 b und 1 c zuzuordnen und differenzierter zu behandeln.

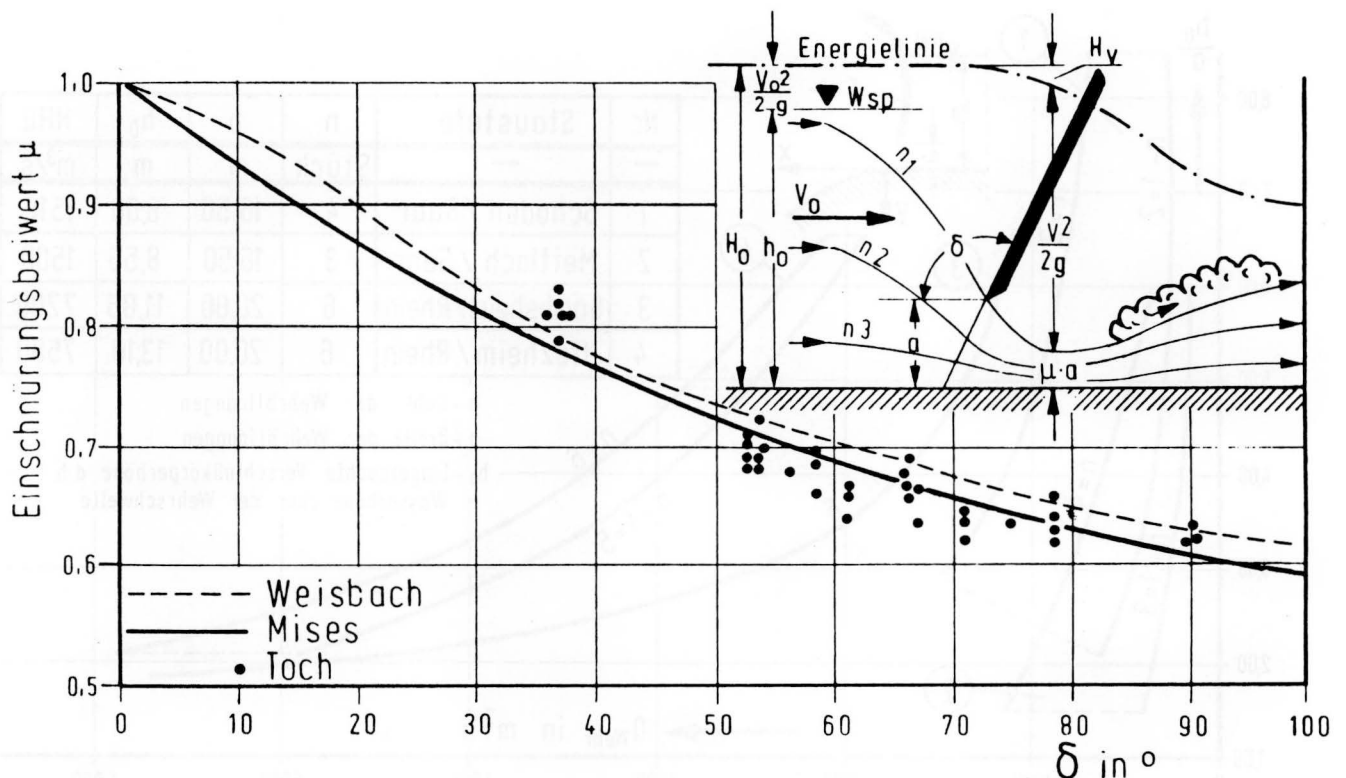


Bild 2: Einfluß des Neigungswinkels δ der Stauwand auf den Einschnürungsbeiwert μ nach /1/

3 Parametergrößen in der Praxis - Beispiele -

Im Vorgriff weiterer Abschnitte sei bereits jetzt schon erwähnt, daß der dimensionslose Parameter h_0/a bzw. $(h_0 - p)/a$ für die Abflußleistung ausschlaggebende Bedeutung hat. Dadurch bedingt wurden die Zahlenwerte h_0/a bzw. $(h_0 - p)/a$ aus den Ergebnissen ausgeführter Modellversuche ermittelt und über dem jeweiligen Wehrabfluß aufgetragen (Bild 3). Der Wehrabfluß wurde dabei

der Wasserführung des Flusses gleichgesetzt. Bei der Interpretation der vorliegenden Beziehungen (Bild 3) ist die Zweiteiligkeit der Wehrverschlüsse und die Existenz der Laufwasserkraftwerke zu berücksichtigen, weil die Stauregelung bei kleinen Wasserführungen des Flusses durch den Kraftwerksbetrieb bzw. die Aufsatzklappen vorgenommen wird. Somit wird erkennbar (Bild 3), daß in den Betriebsfällen des reinen Unterströmens der Parameter h_0/a zwischen 1,5 und 5 variiert. Der genannte Wertebereich $1,5 < h_0/a < 5$ wird durch eine Vielzahl, in der BAW untersuchten Wehranlagen für den Betriebsfall des reinen Unterströmens bestätigt.

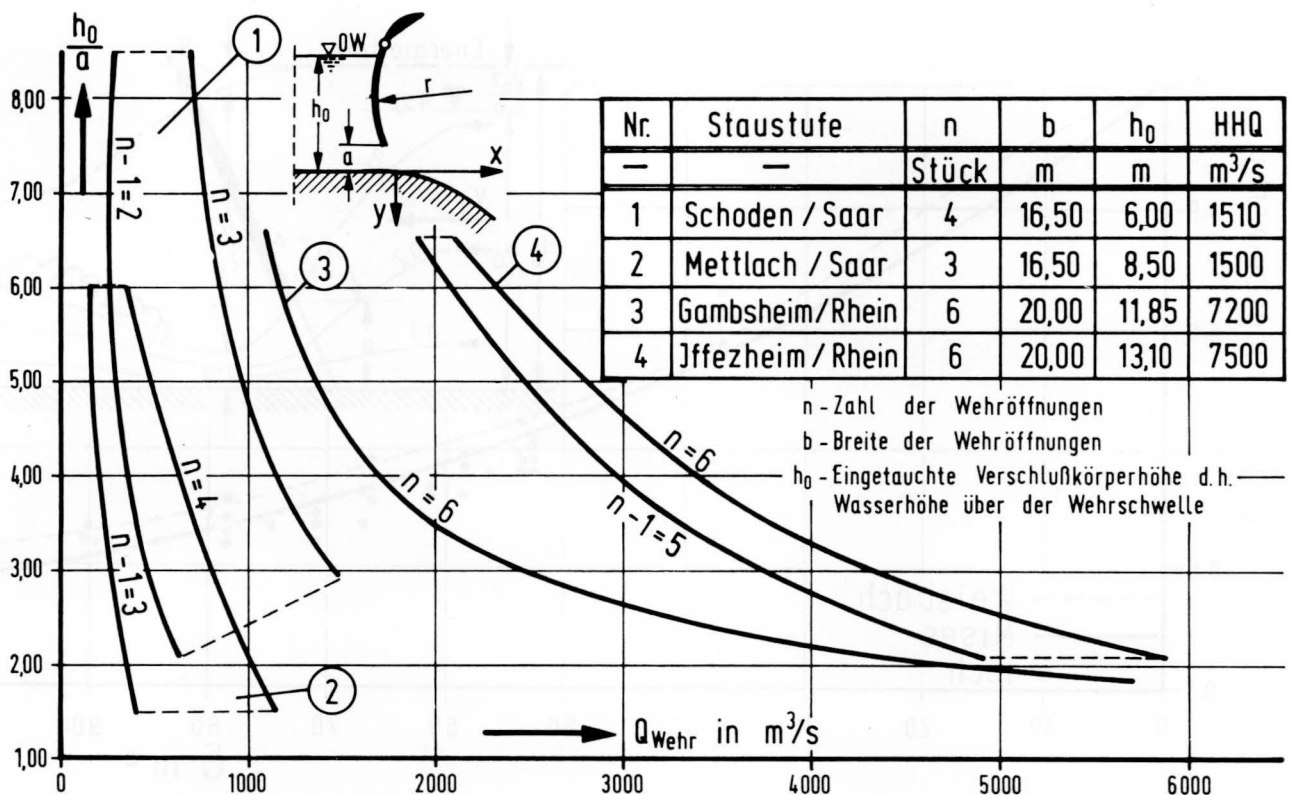


Bild 3: Dimensionsloser Parameter h_0/a in Zuordnung zum Wehrabfluß.
Repräsentative Beispiele.

Daraus geht hervor, daß gerade die Aufschlüsselung der Zusammenhänge in der Bandbreite kleiner h_0/a -Werte wichtig ist. Diese Forderung wird noch verständlicher, wenn man die stark ansteigenden Ausflußzahlen α mit zunehmenden h_0/a -Werten in die Überlegung einbezieht.

Anhand vorliegender Ergebnisse ist feststellbar, daß die Ausflußzahl α in der Bandbreite $1,5 < h_0/a < 5$ sehr stark verändert wird und danach im Bereich $h_0/a > 4,5 \div 5$ nur noch schwach zunimmt bzw. nahezu konstant bleibt.

Hieraus ergeben sich für die Praxis zwei Einschränkungen:

- In der Wertspanne $1,5 < h_0/a < 5$ kann der zunahmebedingte Fehler und somit das Berechnungsergebnis den maximalen Spielraum erreichen.

- b) Der Berechnungsfehler kann besonders schwerwiegend werden, weil dem Wertbereich $1,5 < h_0/a < 5$ der kritische Betriebszustand für die Dimensionierung und somit die Gesamtsicherheit des Bauwerks zuzuordnen ist.

Die in den folgenden Abschnitten 5.1 - 5.5 erfaßte Struktur der Korrelation der Ausflußzahl α mit der Bauwerksgeometrie ist daher schwerpunktmäßig in der Wertspanne $1,5 < h_0/a < 5$ angesiedelt.

4 Die Anordnung und Aufgabe der Untersuchung

Die Abmessungen und Anordnungen der vier untersuchten Gestaltungskonfigurationen zeigt Bild 4. Das Drucksegment (Skizzen 1 und 3 in Bild 4) mit einer Verschußkörperbreite von 20 m war im Maßstab 1:33 1/3 und das Zugsegment (Skizzen 2 und 4 in Bild 4) mit einer Verschußkörperbreite von 16,5 m war im Maßstab 1:30 im Strömungskanal nachgebildet. Bei der verfügbaren Breite des Strömungskanals konnten auch die Wehrpfeiler miterfaßt werden, die den jeweiligen Wehrverschluß einschlossen, was sehr wesentlich ist.

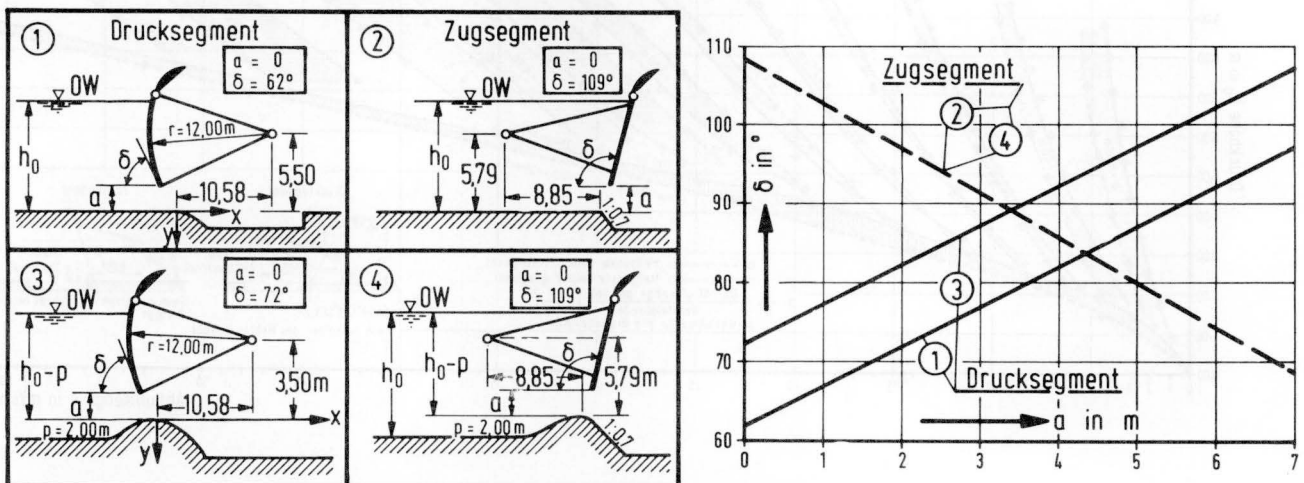


Bild 4: links : Systemskizzen der untersuchten Verschußanordnungen und Sohlenformen.

rechts: Neigungswinkel δ in Abhängigkeit von der lotrechten Öffnungshöhe a für die Skizzen 1-4.

Die Unterwasserspiegellagen wurden während aller Versuche, die zu den in den Abschnitten 5.1 - 5.3 diskutierten Ergebnissen führten, stets so tief gehalten, daß sowohl der Oberwasserstand als auch das Abführungsvermögen des Wehres von ihnen unabhängig blieben. Es wurden also die Bedingungen des vollkommenen Ausflusses eingehalten. Die Neigungswinkel δ , die die Stauwand bzw. Anströmungsecke mit der Horizontalen bildete, sind aus der Grafik in Bild 4 rechts zu entnehmen.

Die Versuche sollten ermöglichen:

- Einen direkten Vergleich zwischen der Abflußleistung eines Zug- und Drucksegments,
- Die Ermittlung des Einflusses einer erhöhten Wehrschwelle (Wehrhöcker) auf die Abflußleistung der Wehranlage.

Für die objektive Interpretation der Meßergebnisse wurde daher konsequenterweise die auf einen Breitenmeter bezogene Abflußleistung $q = Q/b$ (Erguß nach DIN 4044) einheitlich, in den dimensionsabhängigen Diagrammen, eingesetzt.

5 Die Abflußleistung der Bauwerke

Bevor man den Einfluß einzelner Parameter der Randgeometrie anspricht, sei vorweg ein direkter Vergleich der Meßergebnisse vorgenommen (Bilder 5 und 6), die an den durch die Skizzen des Bildes 4 charakterisierten Anordnungen

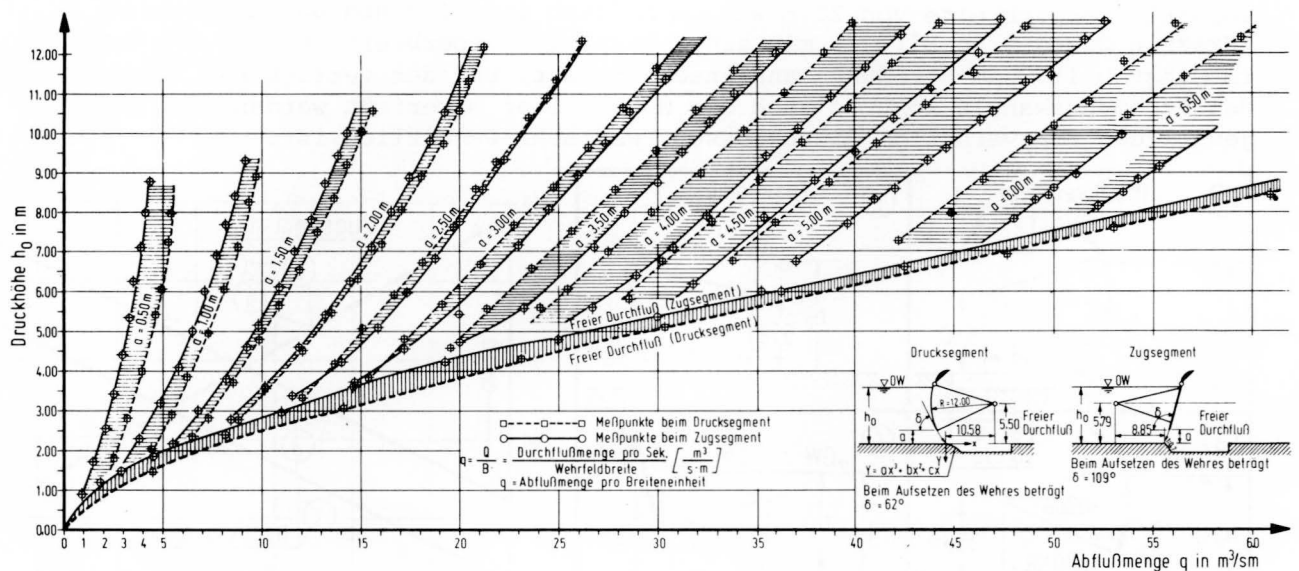


Bild 5: Abhängigkeit der Durchflußmenge unter dem Segment q von der Druckhöhe h_0 und dem Segmenthub a . Nicht erhöhte Wehrschwelle.

gewonnen wurden. Mit den Bildern 5 und 6 wird ein Vergleich der Abflußleistung zwischen dem Druck- und Zugsegment, bei unterschiedlicher Form der Sohle im Bereich unter dem Verschuß gegeben. Beim nicht überhöhten Wehrboden (Bild 5) und Öffnungshöhe $a \leq 2$ cm liegt die Leistung des Zugsegmentes unter der des Drucksegmentes. Mit zunehmender Abflußmenge und dadurch größerem a ändert sich dies zugunsten des Zugsegmentes. Das liegt daran, daß der Winkel zwischen Stauwand und Horizontalen (gemessen zum Oberwasser) beim Heben des Drucksegmentes wächst, beim Zugsegment dagegen kleiner wird.

Bei einem Wehrhöcker werden Stromfäden nicht nur durch die Stauwand und deren Unterkante eingeschnürt, sondern auch zusätzlich durch den Höcker umgelenkt bzw. geführt. Dadurch weichen die Ergebnisse insofern etwas von der vorher aufgezeigten Tendenz ab, als jetzt beim Zugsegment von Anfang an eine höhere Leistungsfähigkeit zu beobachten ist, die bei mittleren Öffnungshöhen am deutlichsten hervortritt (Bild 6).

In umfangreichen Versuchen, die in der BAW für verschiedene Wehranlagen durchgeführt wurden, kam die generelle Tendenz zum Vorschein, daß die erhöhte Wehrrschwelle beim Zugsegment den Anstieg der Leistungsfähigkeit bringt solange der eingetauchte Verschuß noch merkbar am Abflußgeschehen teilnimmt $h_0/a > 1,5 \div 2$.

Man kann also von der größeren Leistungsfähigkeit des Zugsegmentes hinsichtlich einer Verringerung der Wehrbreite nur dann profitieren, wenn das Wehr auch im Hochwasserfall in Staustellung bleiben muß. Falls sich die Segmente vom Wasserspiegel abheben und sich am Wehr freier Durchfluß einstellt, wird dessen Leistungsfähigkeit neben den hydraulischen Größen nur noch von der Form des Wehrbodens bzw. des Wehrrhöckers beeinflusst.

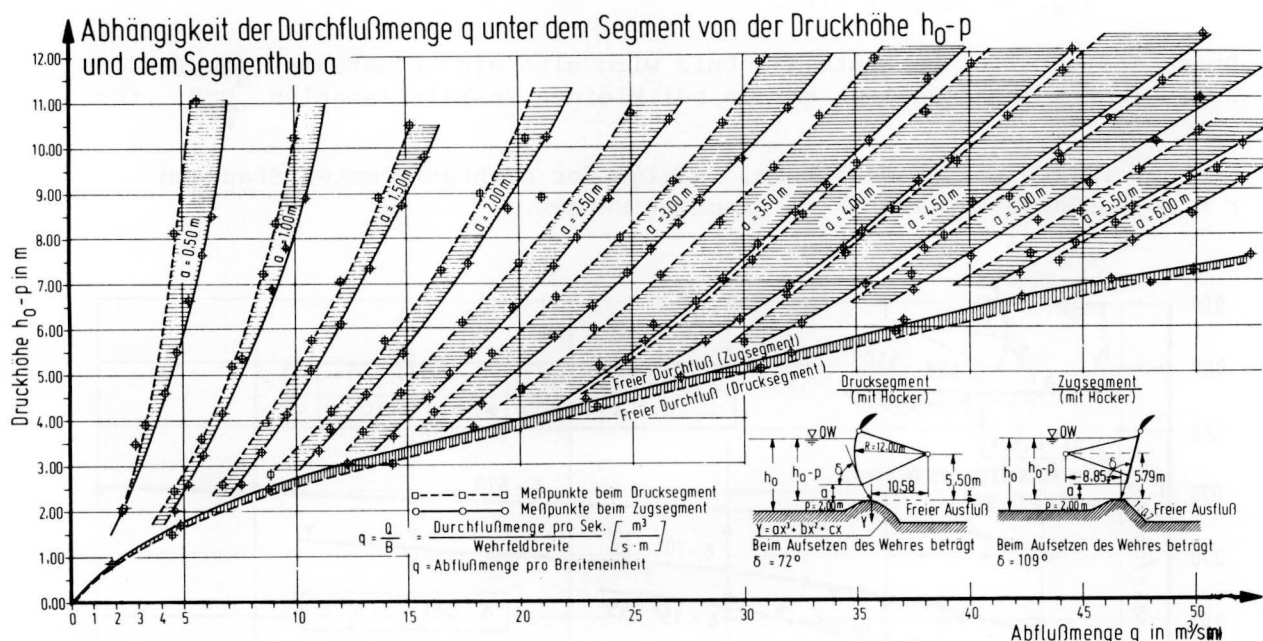


Bild 6: Wie Bild 5 jedoch mit 2 m erhöhter Wehrrschwelle.

5.1 Neigung und Krümmung der Stauwand

Der Einfluß der Neigung δ und Krümmung r der Stauwand auf die Abflußleistung wird beim Vergleich der Ausflußzahlen erkennbar, die auf den Bildern 7 und 8 über dem dimensionslosen Parameter $h_0 - p$ aufgetragen sind. Schon bei einer

flüchtigen Betrachtung der Ergebnisse (siehe Bilder 7 und 8) wird die wesentliche Beteiligung der Sohlenform am Abflußvorgang evident. Ein direkter Vergleich mit früheren experimentellen Untersuchungen z.B. denen von Gentilini (siehe /2/) erscheint daher nur bedingt zutreffend. Die abflußbestimmende Wirkungsart aus der Neigung δ und der Krümmung r der Stauwand läßt sich mittels der Gegenüberstellung von Untersuchungsergebnissen, welche mit der gleichen Form des Wehrbodens unter dem Verschuß aufgenommen wurden, herausfinden. Somit sind aus den Diagrammen der Bilder 7 und 8 nachstehende Folgerungen ableitbar:

- Im untersuchten Winkelspektrum der Stauwandneigung δ wird die Ausflußzahl α dann erhöht, wenn der zum Oberwasser gemessene Neigungswinkel δ abnimmt und der Wehrboden unter dem Verschuß keine erhöhte Schwelle (Wehrröcker) hat.

- b) Innerhalb der Winkelgrößen $\delta = 75^\circ \div 91^\circ$ an der nicht erhöhten Wehrschwelle und $\delta = 77^\circ \div 102^\circ$ an der erhöhten Wehrschwelle kommen bei gleichwertigen Parametern $\frac{h_0-p}{a}$ nahezu konstante

Ausflußzahlen α zum Vorschein (siehe hierzu auch die Bilder 9 und 10 sowie Abschnitt 5.3).

- c) Die Ergebnisse können hinsichtlich der Stauwandkrümmung so ausgelegt werden, daß mit kleiner werdendem Krümmungsradius r die Ausflußzahl α somit an die Abflußleistung der Wehranlage bei gleichbleibenden Randbedingungen, von der Wehrbodenform unabhängig, verringert wird.

Durch das unter c) erwähnte Ergebnis wird also ein bedeutsames Merkmal des Zugsegmentes angezeigt, da gerade bei kleinen Verhältniszahlen $\frac{h_0-p}{a}$ für

die geforderte Hochwasserabfuhr, infolge der nichtgekrümmten Stauwand $r = \infty$, größere Ausflußzahlen erreicht werden.

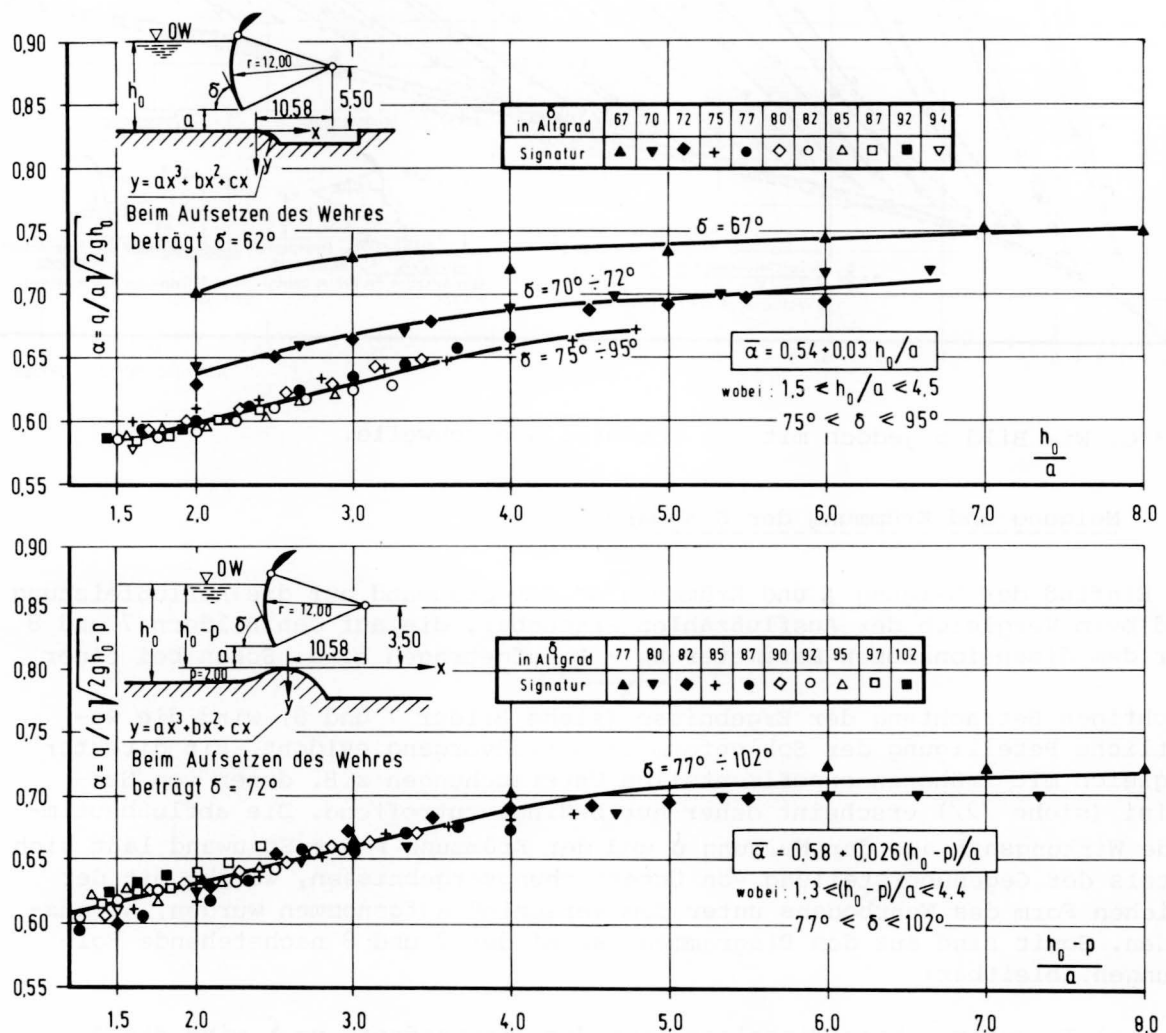
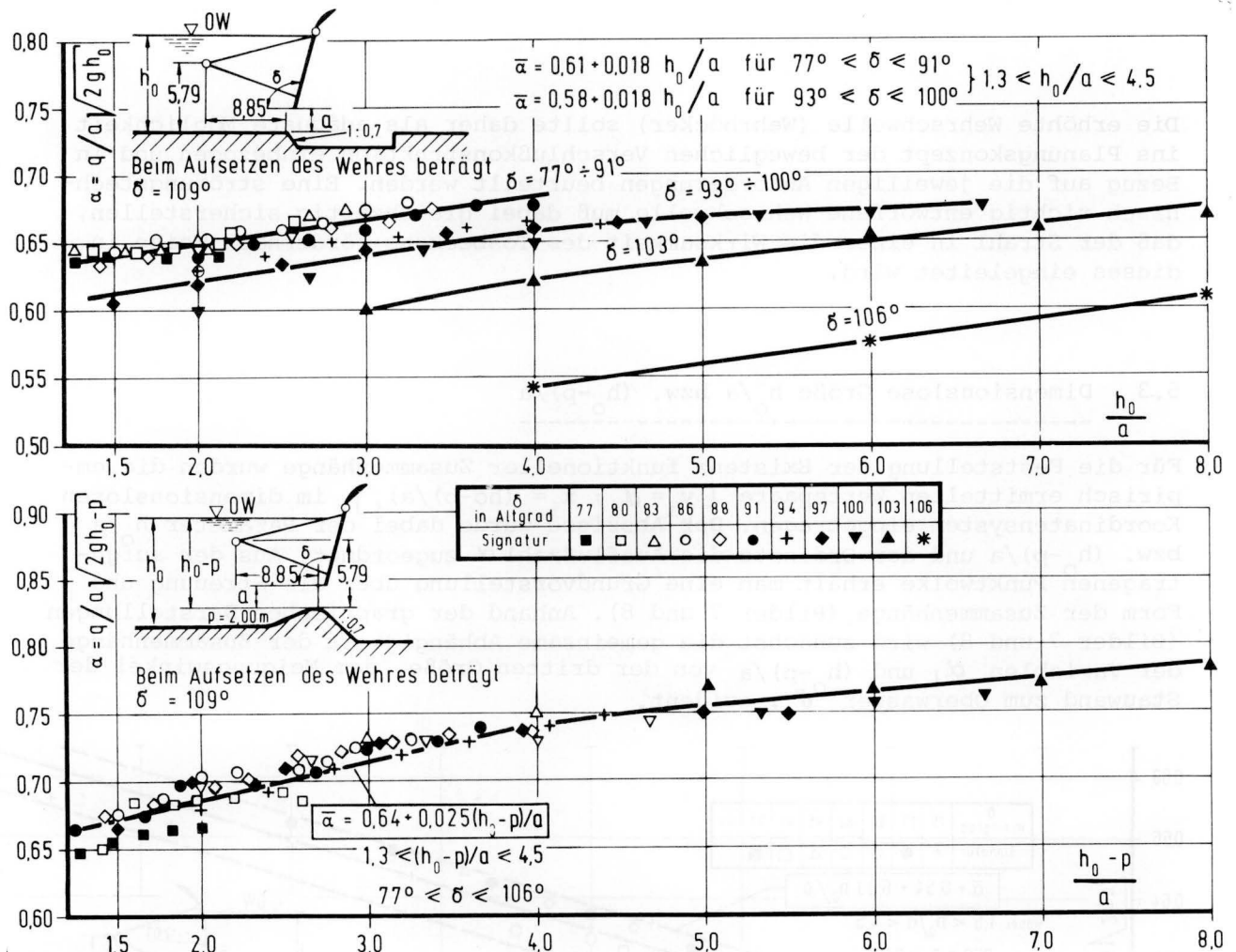


Bild 7: Ausflußzahl α in Zuordnung zum dimensionslosen Parameter $\frac{h_0}{a}$ unter Berücksichtigung der Stauwandneigung δ sowie der Sohlenform unter dem Verschuß. Stauwandkrümmung $r = 12$ m.


Bild 8: Wie Bild 7 jedoch Stauwandkrümmung $r = \infty$

5.2 Sohlenform unter dem Verschluß

Die Sohle im Bereich unter dem Verschluß ist an der Umlenkung der Stromfäden, der Strahlbeschleunigung und der Energieverlustgröße während des Abflusses unter einem Schütz beteiligt. Obwohl auch die Neigung, Abrundung und Höhe der Wehrschwelle in den praktisch interessierenden Fällen zu berücksichtigen sein werden, so kann an dieser Stelle lediglich eine Abschätzung des Effektes der Wehrschwellenerhöhung auf die Veränderung der Ausflußzahl vorgenommen werden. Die Ausflußzahlen α der Bilder 7 und 8 sind dabei als das Maß für die wehrbodenbedingte Veränderung der Abflußleistung zu werten. Aus den Beziehungen dieser Bilder läßt sich nachstehende Tendenz erkennen:

- Durch die Anordnung einer Wehrschwelle wird die Abflußleistung sowohl bei der gekrümmten als auch bei der geneigten Bauart der Wehrverschlüsse, unter Konstanthaltung der restlichen Parametergrößen gesteigert.
- Der Winkelbereich, in dem die Ausflußzahl α von der Stauwandneigung δ unabhängig bleibt, wird durch den Einbau eines Wehrhöckers erweitert.

Die erhöhte Wehrschwelle (Wehrhöcker) sollte daher als adäquate Möglichkeit ins Planungskonzept der beweglichen Verschluskonstruktion einbezogen und in Bezug auf die jeweiligen Anforderungen beurteilt werden. Eine strömungstechnisch richtig entworfene Wehrschwelle muß dabei gleichzeitig sicherstellen, daß der Strahl in einer die Wirksamkeit des Tosbeckens fördernden Weise in dieses eingeleitet wird.

5.3 Dimensionslose Größe h_0/a bzw. $(h_0-p)/a$

Für die Feststellung der Existenz funktioneller Zusammenhänge wurden die empirisch ermittelten Wertepaare $[y_i = \alpha_i; x_i = (h_0-p)/a]$ im dimensionslosen Koordinatensystem eingetragen. Der Abszisse wurde dabei der Parameter h_0/a bzw. $(h_0-p)/a$ und der Ordinate die Ausflußzahl α zugeordnet. Aus der aufgetragenen Punktwolke erhält man eine Grundvorstellung über die Streuung und Form der Zusammenhänge (Bilder 7 und 8). Anhand der graphischen Darstellungen (Bilder 7 und 8) wird zunächst die gemeinsame Abhängigkeit der Zusammenhänge der Variablen α_i und $(h_0-p)/a$ von der dritten Größe, dem Neigungswinkel der Stauwand zum Oberwasser δ , evident.

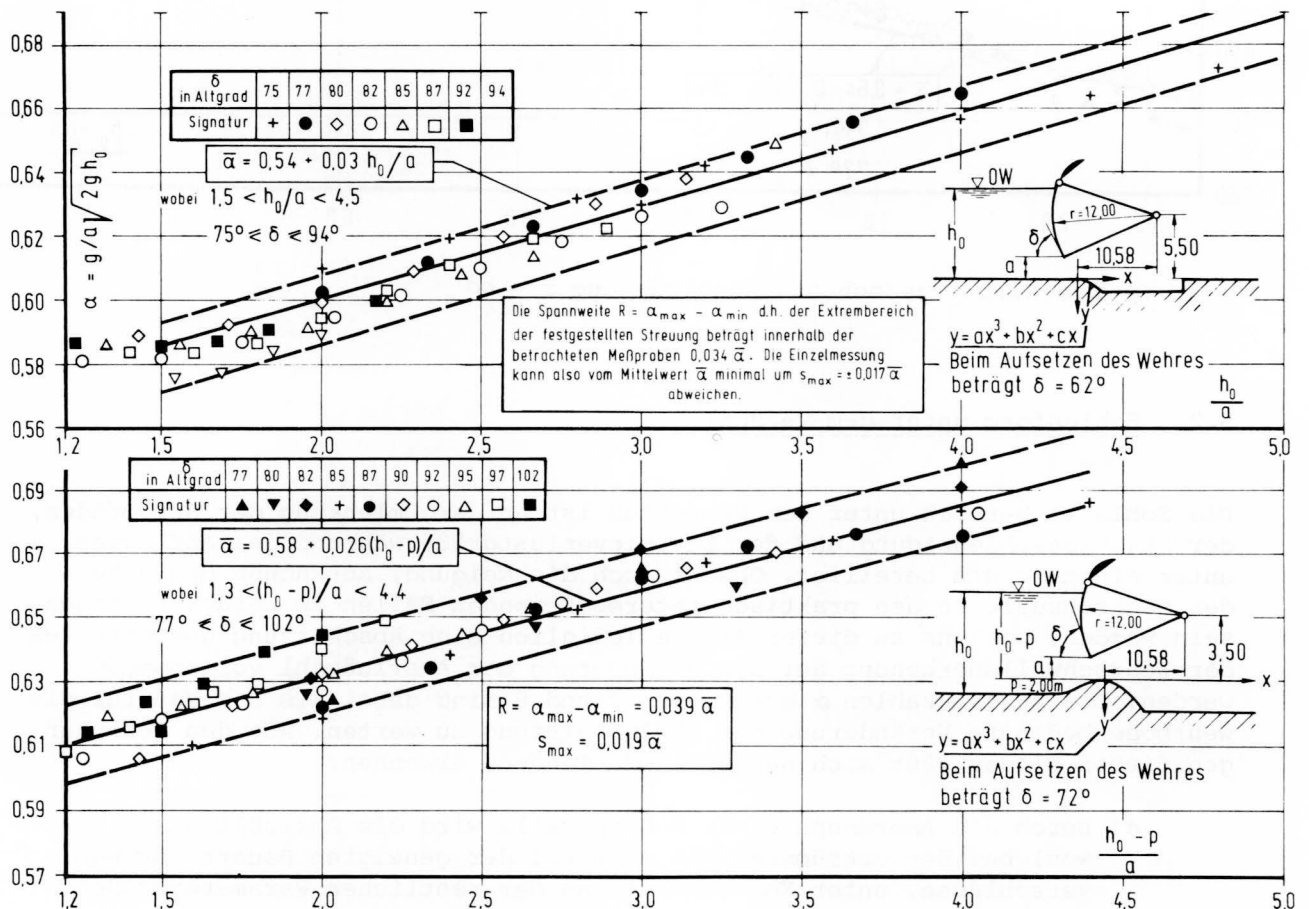


Bild 9: Ausflußzahl α unter der gekrümmten Stauwand $r = 12$ m mit und ohne erhöhter Wehrschwelle. Dimensionsloser Parameter $1.3 \leq \frac{h_0-p}{a} \leq 4.5$

Die dargestellte Punktwolke der empirischen Wertepaare (Bilder 7 und 8) ermöglicht daraus nachstehenden Verteilungsschlüssel zu finden:

- Eine starke Zunahme der abhängigen Zielgröße α und wachsendem $\frac{h_o-p}{a}$ über dem Abszissenabschnitt des Wertbereiches $1,5 < \frac{h_o-p}{a} < 4,5$.
- Nahezu konstant bleibende Ausflußzahlengrößen α im anschließenden Abszissenabschnitt für die Zustände $\frac{h_o-p}{a} > 4,5$.

Der unter Punkt a) genannte Wertbereich $1,5 < \frac{h_o-p}{a} < 4,5$ ist wegen der bereits im Abschnitt 3 formulierten Überlegung von erheblicher praktischer Bedeutung. Wie bereits in den Abschnitten 5.1 und 5.2 erwähnt wird und aus den Bildern 7 und 8 ersichtlich ist, kann der Einfluß der Stauwandneigung für eine Winkelbandbreite $\delta = 90^\circ \pm \Delta\delta$ im $\frac{h_o-p}{a}$ - Wertbereich $1,5 \div 4,5$ zusammengefaßt werden; da die Unterschiede der Ausflußzahlen $\alpha(\delta) - \alpha(\delta \pm n)$ welche zwischen Punktfolgen konstanter $\frac{h_o-p}{a}$ - Zahlen in Erscheinung treten, gering sind. Um diese Merkmale zu verdeutlichen, wurden den Wertepaaren einzelner Meßreihen verschiedene Signaturen zugeordnet und für jede der vier untersuchten Anordnungen (siehe Bild 4) im $\alpha_i - (\frac{h_o-p}{a})_i$ - Koordinationssystem aufgetragen (Bilder 9 und 10). Aus den Punktfolgen ersieht man, daß zu jeder der vier untersuchten Anordnungen ein zusammenfaßbares Maß von Winkelgrößen der Stauwandneigung δ vorhanden ist, dem ein gemeinsamer korrelativer Zusammenhang entspricht. Die vorliegenden Datenpaare $[\alpha_i; (\frac{h_o-p}{a})_i]$ ergaben nach der Methode der kleinsten Quadrate die Regressionsgeraden, deren Gleichungen in den Bildern 9 und 10 angeschrieben sind. Die Regressionsgeraden konnten im Prinzip in die Meßpunktfolgen gut eingepaßt werden.

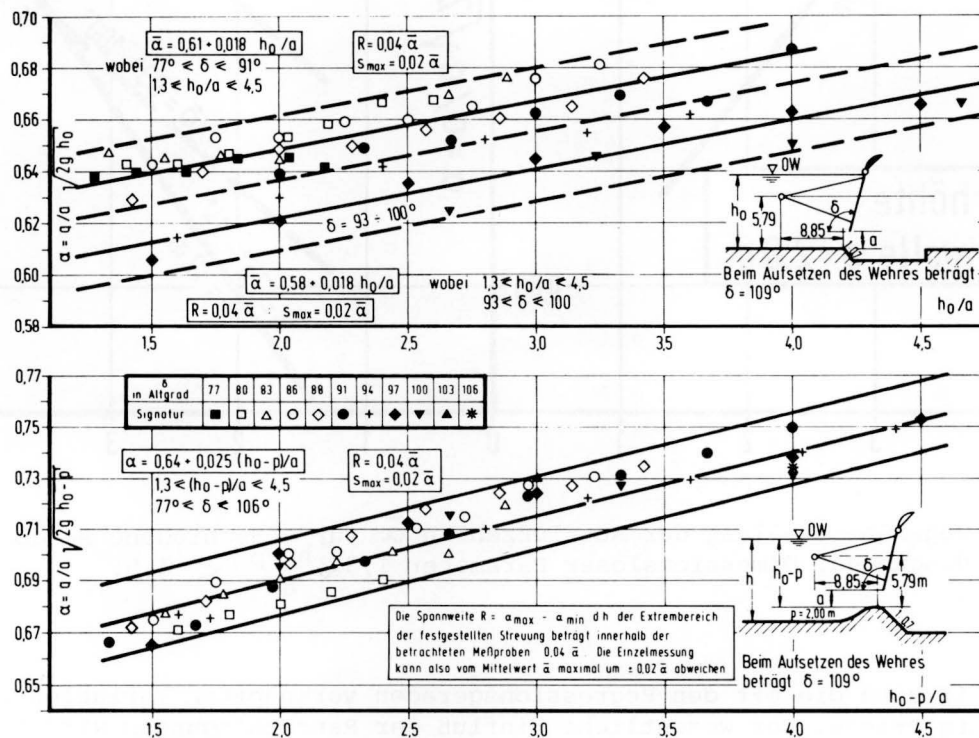


Bild 10: Ausflußzahl unter der geneigten Stauwand $r = \infty$ mit und ohne erhöhter Wehrschwelle. Dimensionsloser Parameter $1,3 \leq \frac{h_o-p}{a} \leq 4,5$.

Die Abweichung einzelner Meßwerte von den für alle Meßwerte repräsentativen Geraden ist nicht größer als $0,02 \cdot \bar{\alpha}$; wobei $\bar{\alpha}$ den aus der Regressionsfunktion $\bar{\alpha} = A + B \left(\frac{h_0 - p}{a} \right)$ berechneten Wert der Ausflußzahl darstellt.

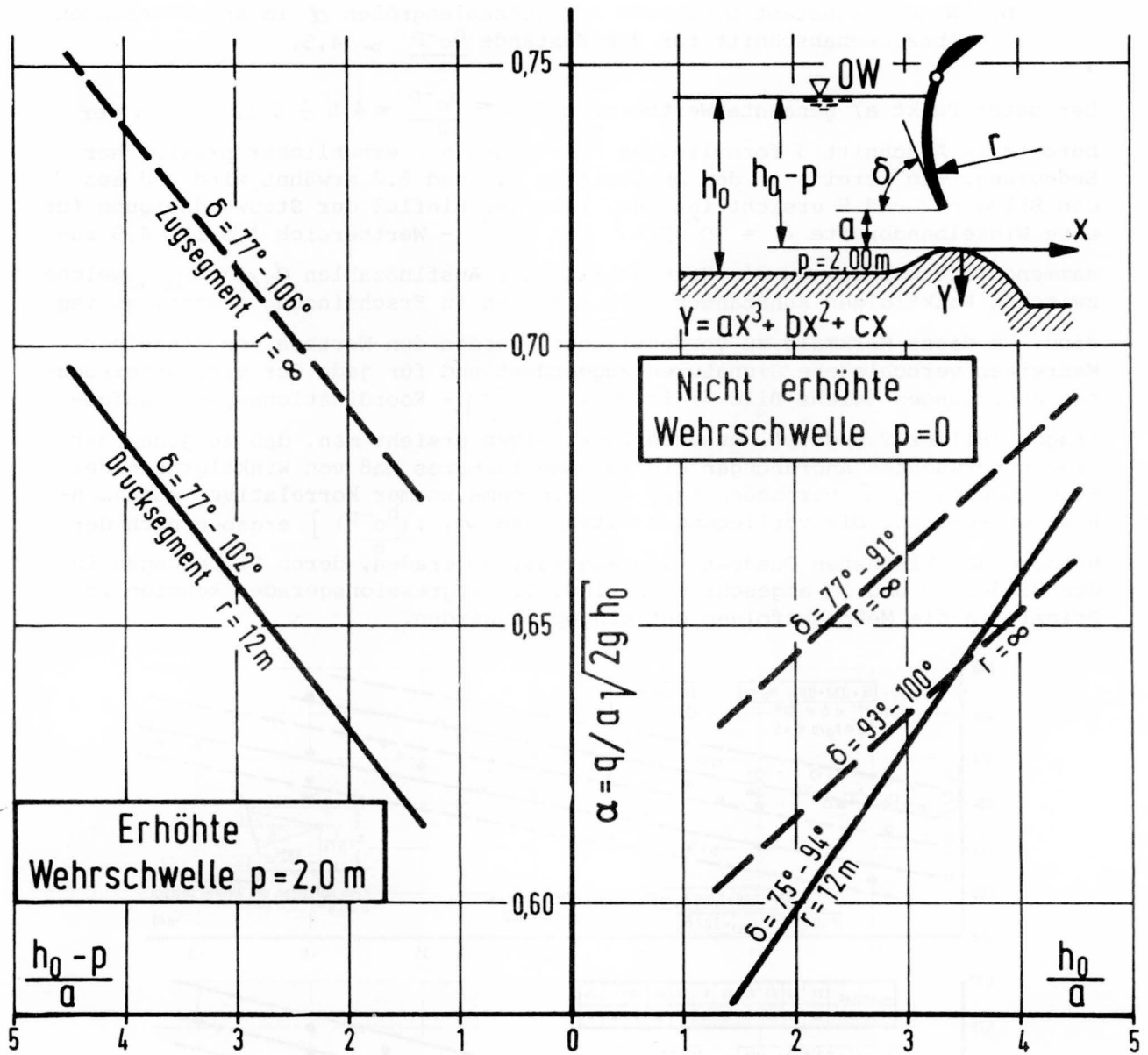


Bild 11: Gegenüberstellung der Ausflußzahlen $\bar{\alpha}$ für verschiedene Randbedingungen. Dimensionsloser Parameter $1,3 < \frac{h_0 - p}{a} < 4,5$.

Auf Bild 11 sind die mit den Regressionsgeraden verknüpften Variablen zum Vergleich aufgetragen. Der wesentliche Einfluß der Randbedingungen wird bei einer vergleichenden Betrachtung des Bildes 11 sichtbar. Bei gleichwertigen Parametern $\frac{h_0 - p}{a}$ bzw. h_0/a werden zwischen den Ausflußzahlen Unterschiede

von 15 ÷ 18 % evident. Wenn man darüber hinaus die Ausflußzahlen aus verschiedenen Handbüchern in den Vergleich einbezieht, so können dabei Abweichungen bis zu 25 ÷ 30 % gegenüber den Werten des Bildes 11 vorkommen. Die aufbereiteten und erfaßten Meßgrößen streuen von den "IM DURCHSCHNITT" wahren Wert $\bar{\alpha}$ der Regressionsfunktion bis zu $\pm 0,02 \bar{\alpha}$. Daher sind bei der Interpretation der Abflußmengen, die mit den Ausflußzahlen des Bildes 11 berechnet werden, mögliche Toleranzgrenzen von $\pm 0,02 \bar{\alpha}$ vor auszusetzen.

5.4 Unterwasserspiegellage

Im Bereich des rückgestauten Abflusses ist die Druckhöhe (Oberwassertiefe) h_0 für die Abflußleistung nicht mehr die allein maßgebende Größe, weil der engste (eingeschnürte) Querschnitt unterhalb der Stauwand $\mu \cdot a$ (siehe Skizze in Bild 2) durch die Deckwalze überlagert wird.

In diesem Fall muß die Druckhöhe des vollkommenen Abflusses h_0 durch eine reduzierte Druckhöhe h ersetzt werden. Die Reduzierung der wirksamen Druckhöhe h_0 auf h , die infolge des Unterwassereinflusses auftritt, wird praktisch durch einen besonderen Koeffizienten κ vorgenommen

$$\kappa = \sqrt{\frac{h}{h_0}} \quad (4)$$

Dieser Koeffizient κ ist aus den Meßwerten einer weiteren Versuchsreihe nach der Gleichung

$$\kappa = \frac{q}{\alpha \cdot a \sqrt{2g(h_0 - p)}} \quad (5)$$

berechnet worden (Bedeutung der Symbole siehe Abschnitte 1 und 2). Weiter sind aus jeder im Modell realisierten Kombination von h_0 , a und p charakteristische Kenngrößen $(h_0 - p)/a$ und h_u/a gebildet und dem vorher berechneten κ -Wert zugeordnet worden (Bild 12). Anhand dieser Abbildung kann folgendes festgestellt werden:

- Jeder Anstieg der Kenngröße $(h_0 - p)/a$ bewirkt eine Zunahme des Koeffizienten κ
- Der Beiwert κ wird mit jeder Zunahme der Kenngröße h_u/a kleiner.

Im genannten Bild 12 spiegelt sich deutlich die Erscheinung wieder, daß mit steigendem Unterwasserstand der Koeffizient κ stark abnimmt und sogar Extremwerte von 0,6 bis 0,7 erreichen kann.

Das bedeutet für die untersuchten Fälle, daß durch hohe Unterwasserspiegellagen die Abflußleistung des Wehres bis zu 30 bis 40 % verringert werden kann.

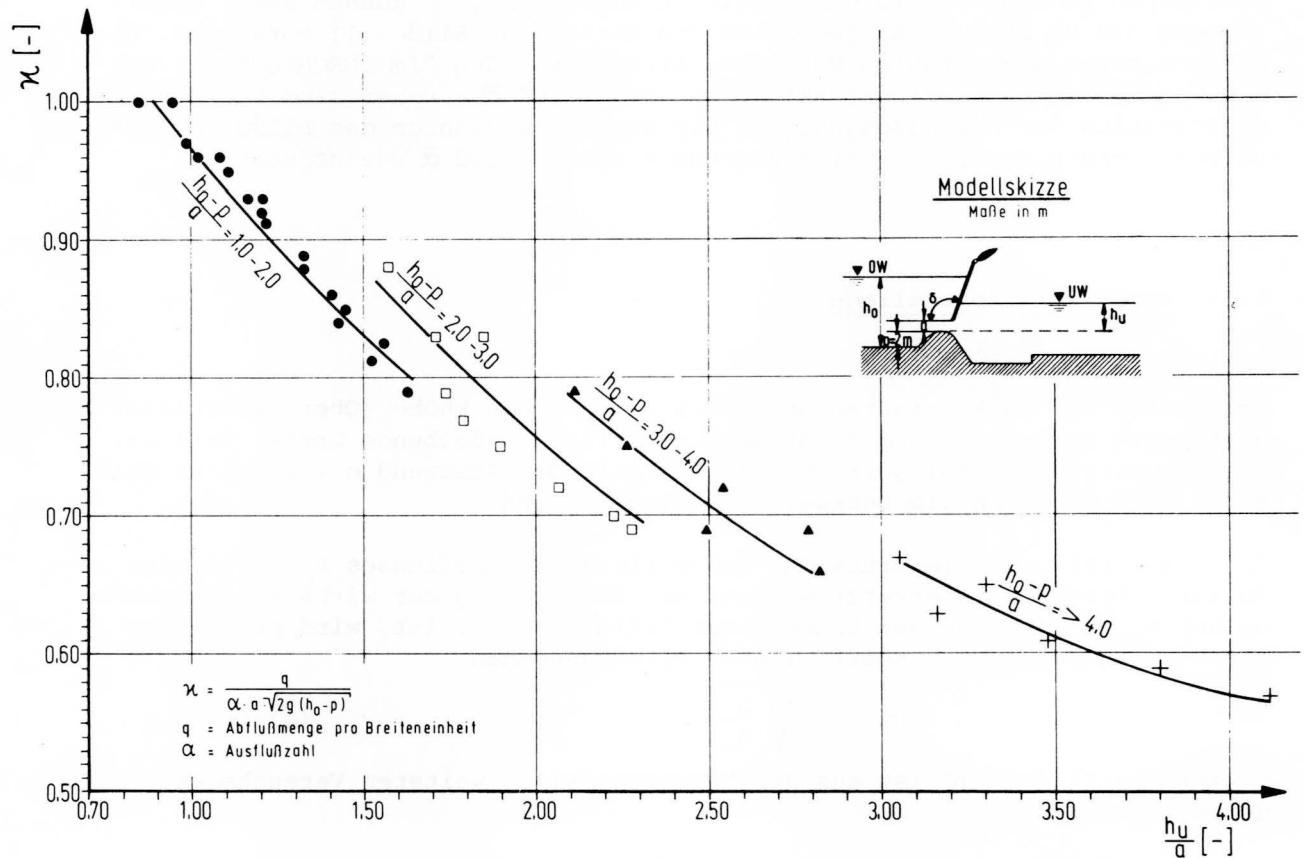


Bild 12: Dimensionsloser Koeffizient für den Einfluß der Unterwasserspiegellage h_u beim unvollkommenen Ausfluß.

Die Meßergebnisse des Bildes 12 stimmen qualitativ mit den früheren Ergebnissen von Schmidt /3/ überein. Der quantitative Vergleich läßt jedoch eine beachtliche Diskrepanz erkennen. Es besteht daher der Grund zur Annahme, daß auch die Druckhöhenverlustgröße (d.h. die Koeffizientenwerte κ) von der gesamten Randgeometrie des Bauwerks (also sowohl von der Schützform als auch der Sohlengestaltung) unter dem Verschluß abhängig sind.

5.5 Räumliche Anströmungsverluste

Die Modelluntersuchungen für das Rheinwehr Iffezheim wurden sowohl in einem Gesamtmodell der Stauanlage im Maßstab 1:100 als auch in einem Teilmodell des Wehres im Maßstab 1:33 1/3 durchgeführt.

Im zuerst genannten Fall war die gesamte Wehranlage einschl. der oberen und unteren Wehrbucht so nachgebildet, daß sich die dreidimensionalen Strömungserscheinungen ohne störende Nebenwirkungen der Modellränder einstellen konnten. Beim Teilmodell kam es von der Aufgabenstellung her (Wehrschwelle, Sturzbett, Sohlensicherung) auf möglichst großmaßstäbliche Untersuchungen an, so daß im vorhandenen 2,50 m breiten Versuchsgerinne nur drei der sechs Wehrfelder einschl. der sie begrenzenden Pfeiler nachgebildet werden konnten. Da bei diesem Versuchsaufbau die Buchtlage des Wehres unberücksichtigt bleiben mußte und die Wehranströmung zwischen parallelen Wänden vor sich ging, soll von einem quasi 3-dimensionalen Modell gesprochen werden.

Um auch eine Gegenüberstellung der Abflußleistung bei verschiedenen Stellungen der Drucksegmente ohne dem Verlustanteil des örtlichen Formwiderstandes (Strömungswiderstand der Pfeiler und des geschlossenen Wehrfeldes) zu gewinnen, wurde auch eine Untersuchungsreihe mit rein 2-dimensionaler Randgeometrie ausgeführt. In der rein 2-dimensionalen Versuchsanordnung waren nur die vertikalen Umrisse, demnach keine Pfeiler oder Wehrwangen im Versuchskanal nachgebildet (Maßstab 1:33 1/3).

Durch Einführung eines Beiwertes ω für den Einfluß der räumlichen Strömungsvorgänge in der Wehrbucht und an den Wehrpfeilern können die Ergebnisse aus allen drei Modellen miteinander verbunden werden, wenn man die Ausflußformel um diesen Beiwert ω erweitert, der beim rein 2-dimensionalen Strömungsvorgang $\omega = 1,0$ betragen soll.

$$Q = \omega \cdot K \cdot \alpha \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2 g h_0} \quad (6)$$

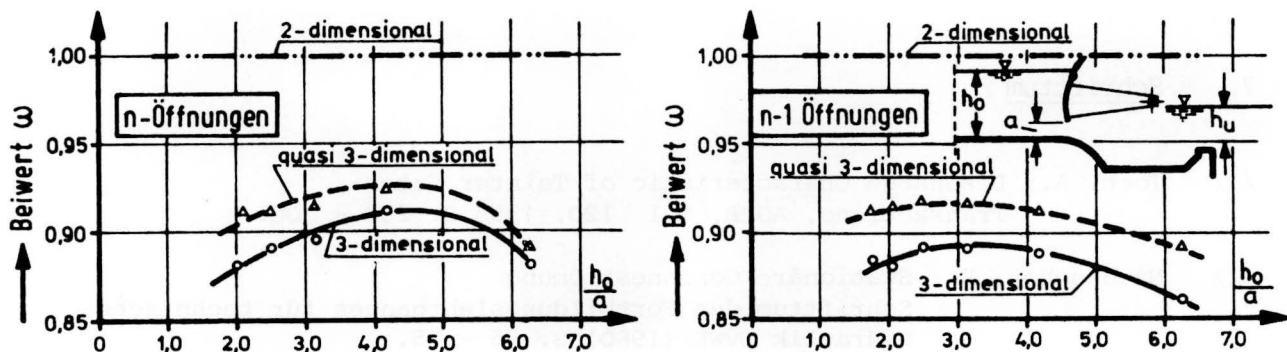


Bild 13: Dimensionsloser Beiwert ω für den Einfluß räumlicher Strömungsvorgänge.

Die derartig aufbereiteten Ergebnisse zeigen, daß der Beiwert ω stark vom Verhältnis der Oberwassertiefe h_0 zur lotrechten Öffnungshöhe a unter dem Segment abhängt (Bild 13). Man erkennt, daß der Einfluß der Wehrpfeiler (Übergang vom zwei- zum quasi dreidimensionalen Modell) wesentlich stärker ist als der Einfluß der Wehrbucht, der beim weiteren Übergang auf die drei-

dimensionale Modellanordnung deutlich wird. Beim Verschluß einer Wehröffnung ($n - 1$) fällt der ω -Wert für $h_0/a > 2,0$ noch etwas mehr ab, da jetzt auch der Einfluß der Kontraktion und der seitlichen Ablösungen hinzukommt.

Insgesamt können die Ergebnisse zeigen, daß die Leistungsfähigkeit der untersuchten Wehranlage mit den unterströmten Drucksegmenten um 10 bis 15 % abnehmen kann, wenn starke räumliche Strömungswirkungen vorliegen.

6 Zusammenfassung

Segmentverschlüsse werden an Wehranlagen der Wasserstraßen neuerdings bevorzugt gewählt. Bei der Entwurfsbearbeitung muß dabei berücksichtigt werden, daß die Abflußleistung in entscheidendem Maße von der Gestaltung der Sohle unter dem Verschluß beeinflusst wird. In den vorstehenden Abschnitten sind die Meßergebnisse aus hydraulischen Versuchen, die in der BAW für verschiedene Wehranlagen durchgeführt wurden, ausgewertet und in dimensionslosen Darstellungen angegeben. Im Gegensatz zu den in vielen Handbüchern zu findenden Bemessungsgrößen sind hier erhebliche Diskrepanzen erkennbar. Diese Abweichungen sind auf die bauwerksspezifischen Anordnungen und wohl auch auf die gelegentlich zu stark idealisierten Randbedingungen zurückzuführen. In den Abschnitten 5.4 und 5.5 werden auch die abflußmindernden Effekte des Rückstaus und der räumlichen Strömungsverluste angesprochen. Die vorstehenden Versuchsergebnisse sollen die praxisnahe Entwurfsbearbeitung erleichtern.

7. Schrifttum

- /1/ Toch, A.: Discharge Characteristic of Tainter Gates
Transactions, ASCE, Vol 120, 1955 S. 290 - 300.
- /2/ Naudascher, E.: Stationäre Gerinneströmung
Schrifttum des Fortbildungslehrganges für technische
Hydraulik DVWK (1980) S. 65 - 75.
- /3/ Schmidt, M.: Der vollkommene und unvollkommene Ausfluß unter Schützen.
Die Bautechnik (1957) H. 8 S. 301 - 303.

Dipl.-Ing. Bernhard K e m n i t z

BEITRAG ZUR VERRINGERUNG DER QUERGESCHWINDIGKEITEN
IM UNTEREN SCHLEUSENVORHAFEN EINER STAUSTUFE

On the reduction of cross velocities
in a lower lock approach

Zusammenfassung

An dem wasserbaulichen Modell einer Staustufe mit Groß- und Kleinschiffahrtsschleuse wurde die Strömung in den unteren Vorhafeneinfahrten bei verschiedenen Wehr-, Kraftwerks- und Schleusenabflüssen beobachtet. Da bei allen drei Abflußarten unzulässig hohe Quergeschwindigkeiten auftraten, wurde mit Erfolg versucht, durch bauliche Maßnahmen Abhilfe zu schaffen.

Summary

On the physical model of a barrage with two locks the currents in downstream lock approaches on different discharges through weir, power station and lock have been observed. Since in all three sorts of discharges inadmissible cross velocities occurred, it has successfully been tried to reduce these by constructional modifications.

I N H A L T

	Seite
1 Einleitung und Aufgabenstellung	21
2 Grundlagen für die Modellversuche	21
3 Quergeschwindigkeiten bei Kraftwerksabfluß	23
4 Quergeschwindigkeiten bei hohen Wehrabflüssen	25
5 Quergeschwindigkeiten bei niedrigen Wehrabflüssen	27
6 Quergeschwindigkeiten bei Schleusenentleerung	28
7 Literatur	30

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Der ursprünglich ungestörte Verlauf der Saar oberhalb der Ortschaft Serrig wird wegen des Ausbaus zur Wasserstraße durch eine Staustufe unterbrochen werden, so daß hier eine Fallhöhe von bis zu 14,50 m auftreten wird. Die Staustufe wird gebildet aus:

Großschiffahrtsschleuse mit 190,00 m Nutzlänge und 12,00 m Breite;
Kleinschiffahrtsschleuse mit 40,00 m Nutzlänge und 6,75 m Breite;
Wehranlage mit 3 Feldern à 16,50 m Durchflußbreite und Zugsegmentverschlüssen mit aufgesetzten Fischbauchklappen;
Kraftwerk mit 2 Rohrturbinen.

An einem wasserbaulichen Modell der Staustufe wurden außer der Wehranlage mitsamt der Hochwasserabfuhr und den Strömungsverhältnissen im Oberwasser auch die Schiffahrtsbedingungen im Unterwasser untersucht. Ziel der hier beschriebenen Versuche am verkleinerten Modell war es, Empfehlungen für das Gestalten des Unterwassers und seiner Bauteile zu erarbeiten, so daß bei deren Befolgung für den Schiffsverkehr in den Einfahrten zu den unteren Schleusenvorhöfen nennenswerte Behinderungen durch Querströmungen nicht zu erwarten sein würden.

Diese Aufgabe erwies sich als äußerst vielschichtig, da die Strömung im Fahrwasser durch die verschiedenartigsten Abflußzustände, die allein oder in Kombination miteinander auftreten können, gesteuert wird. Allein am Wehr kann der gleiche Abfluß auf unendlich viele Arten ins UW geleitet werden. So kann der Abfluß unter drei oder nur zwei Segmenten, die alle gleich oder unterschiedlich hoch stehen können, abgeführt werden; es können die aufgesetzten Fischbauchklappen teilweise oder sämtlich, in unterschiedlicher Stärke, mit zur Abfuhr herangezogen werden. Davon abgesehen, schwankt die Höhe des an der Staustufe abzuführenden Abflusses im betrachteten Fall zwischen einem Wert nahe Null und dem $HSQ = 400 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei ausreichendem Wasserangebot werden hiervon $60 \text{ m}^3/\text{s}$ durch das Kraftwerk gelenkt und anschließend seitlich in das UW geleitet. Als letzte, aber durchaus nicht zu vernachlässigende Abflußart sei die Entleerung der Großschiffahrtsschleuse genannt; durch das hierbei abströmende Schleusungswasser können in der Einfahrt zum Vorhafen der benachbarten Kleinschiffahrtsschleuse unangenehme Quergeschwindigkeiten hervorgerufen werden.

2 Grundlagen für die Modellversuche

Das im Maßstab 1: 33 $\frac{1}{3}$ gegenüber der späteren Naturausführung verkleinerte Modell (Bild 1) war aus Mauerwerk, Beton und Metall erstellt worden und wurde auf der Grundlage des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes betrieben. Sämtliche Angaben werden auf die Naturausführung bezogen, um so Mißverständnissen vorzubeugen.

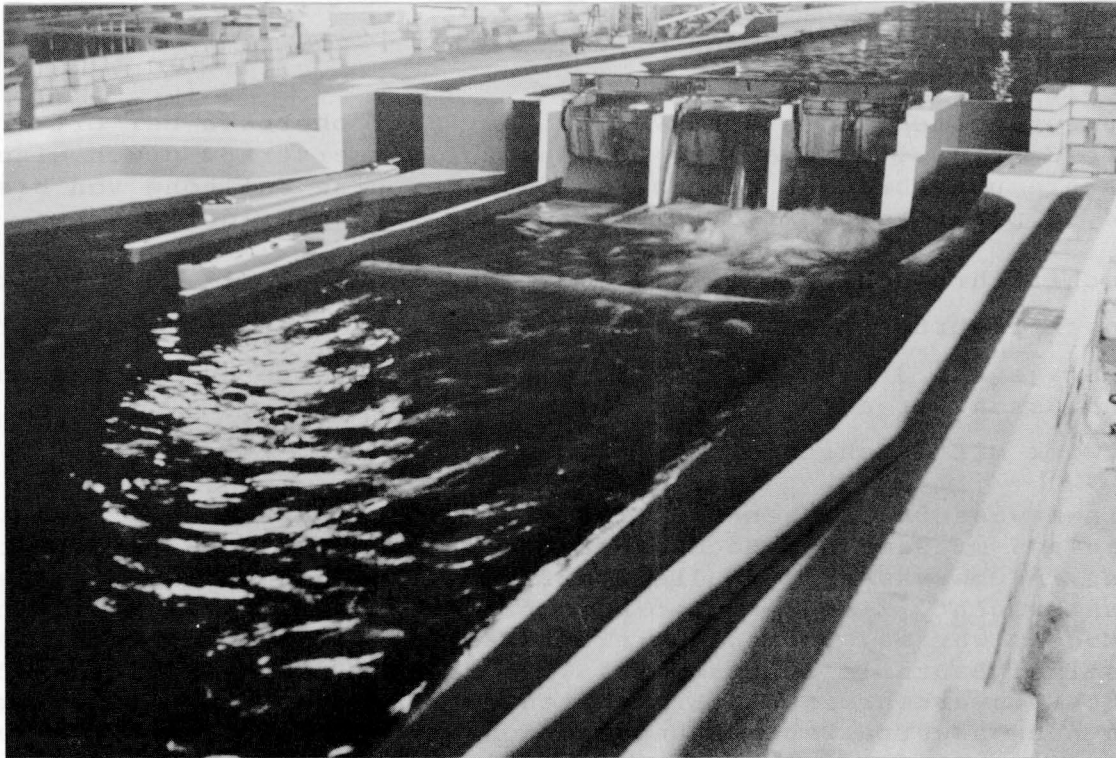


Bild 1 Modell der Staustufe

Abgestützt auf Grundsatzuntersuchungen von JAMBOR /1/ im Vorfeld des Moselausbaus wurden die Schifffahrtsverhältnisse anhand der Fließgeschwindigkeiten im Fahrwasser beurteilt. Als Resultat dieser Untersuchungen war nachgewiesen worden, daß im Einfahrtsbereich des unteren Schleusenvorhafens die Komponente der Fließgeschwindigkeit quer zur Schifffahrtsachse nicht größer als 30 cm/s sein darf, wenn strömungsbedingte Schwierigkeiten und Behinderungen für die Schifffahrt sicher ausgeschlossen sein sollen. Dieser Wert war nach Vollendung des Moselausbaus durch die Schifffahrt bestätigt worden (DIETZ /2/). Deshalb wurde die Wirkung der einzelnen Baumaßnahmen mittels der entlang den Schifffahrtsachsen gemessenen Fließgeschwindigkeiten bewertet. In einer Tiefe von 1,25 m auf der Groß- und 1,00 m auf der Kleinschifffahrtsachse wurden Richtung und Größe der Fließgeschwindigkeit durch Meßflügel punktweise erfaßt. Der Anteil der Geschwindigkeit in Querrichtung wurde auf rechnerischem Wege bestimmt.

Ein weiteres Hilfsmittel für die Beurteilung und Fortentwicklung der baulichen Varianten stand in Form von fotografisch gewonnenen Aufnahmen der Oberflächenströmung zur Verfügung.

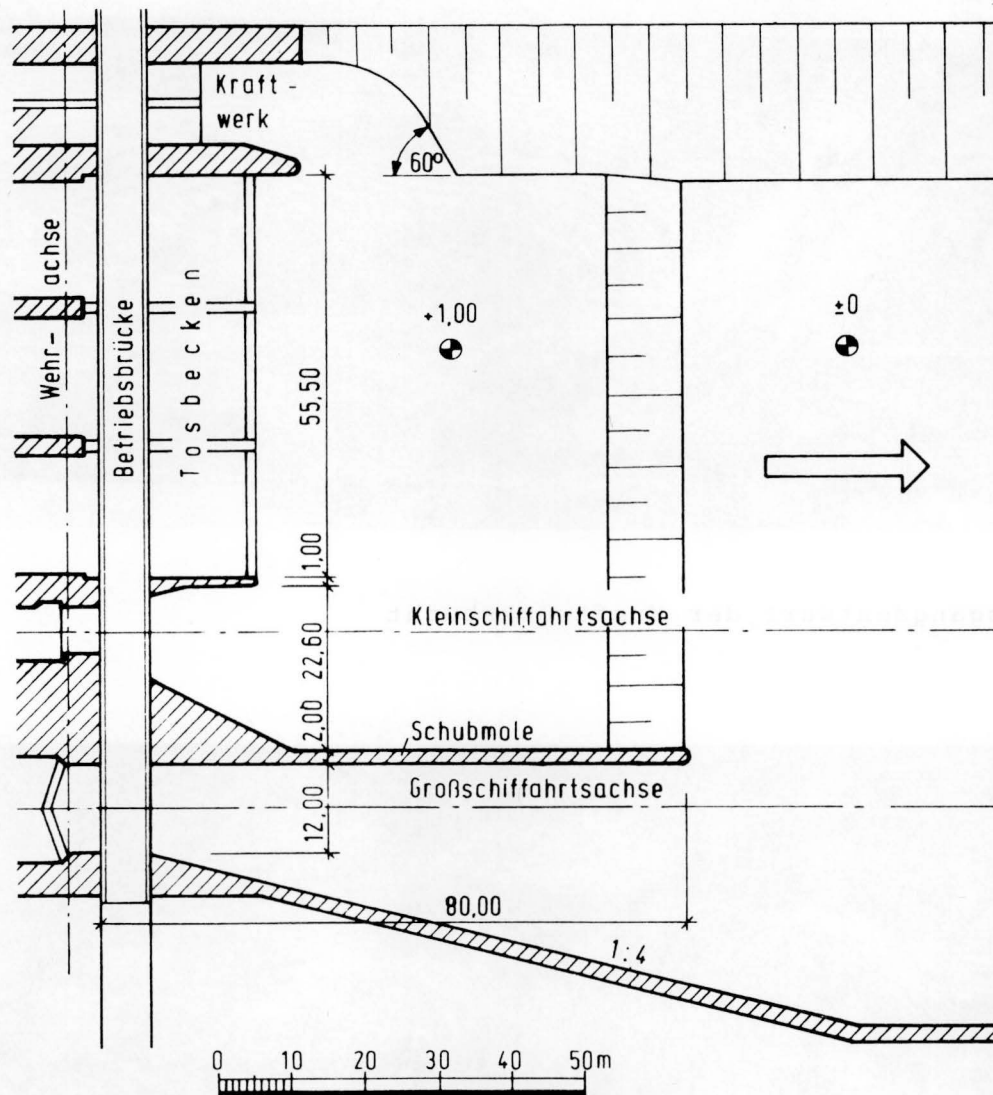
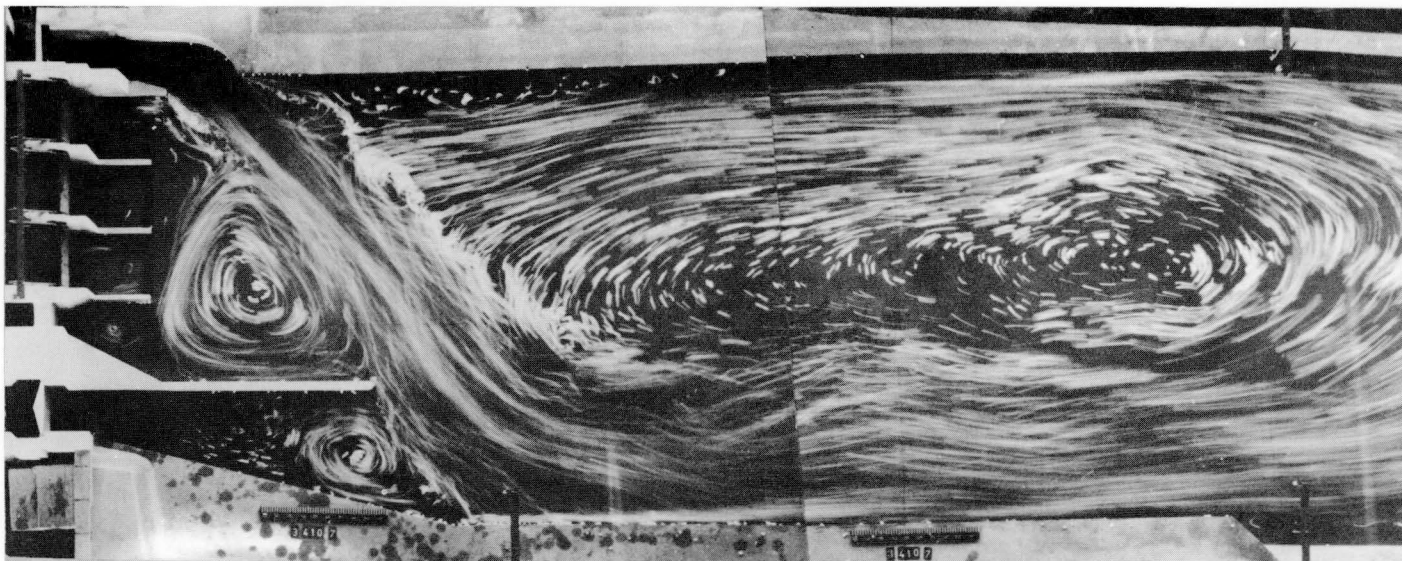


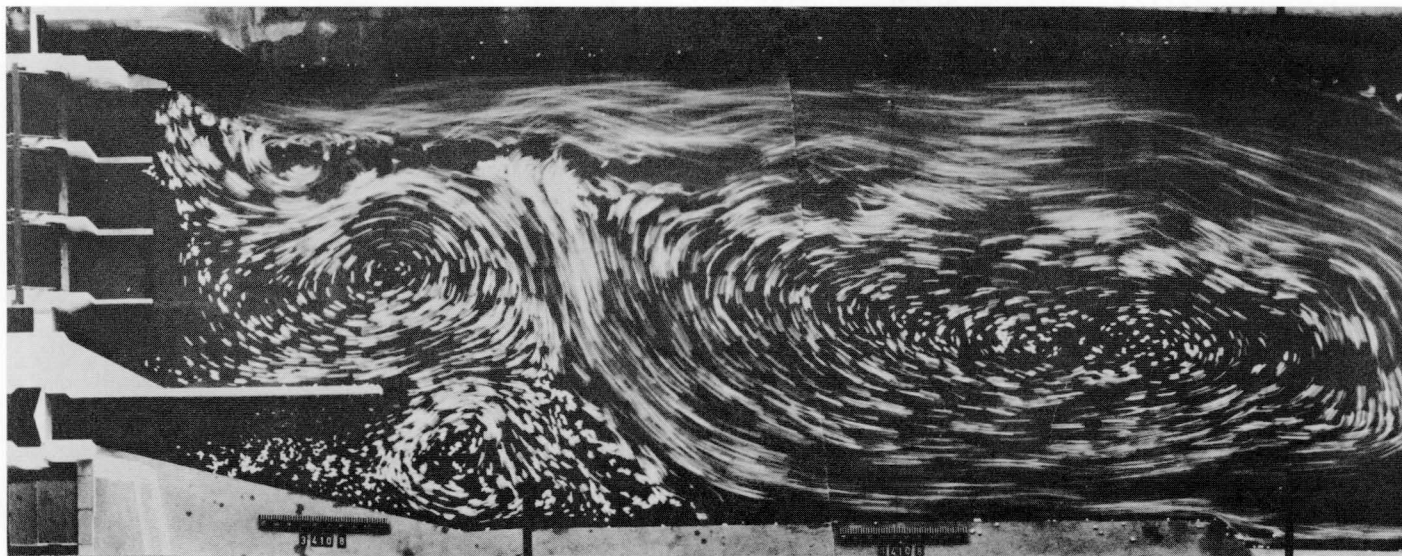
Bild 2 Ausgangsentwurf der Unterwassergestaltung

3 Quergeschwindigkeiten bei Kraftwerksabfluß

Das an der Staustufe Serrig links neben dem Wehr geplante Kraftwerk wird für einen Abfluß von $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt werden, was etwa dem MQ entspricht; dieser Abfluß wurde den in diesem Abschnitt erläuterten Versuchen zugrunde gelegt, das bedeutet, daß das Wehr nicht beaufschlagt wurde.



a) Ausgangsentwurf der Kraftwerksbucht



b) Ausführungsvorschlag der Kraftwerksbucht

Bild 3 Oberflächenströmung bei Kraftwerksabfluß

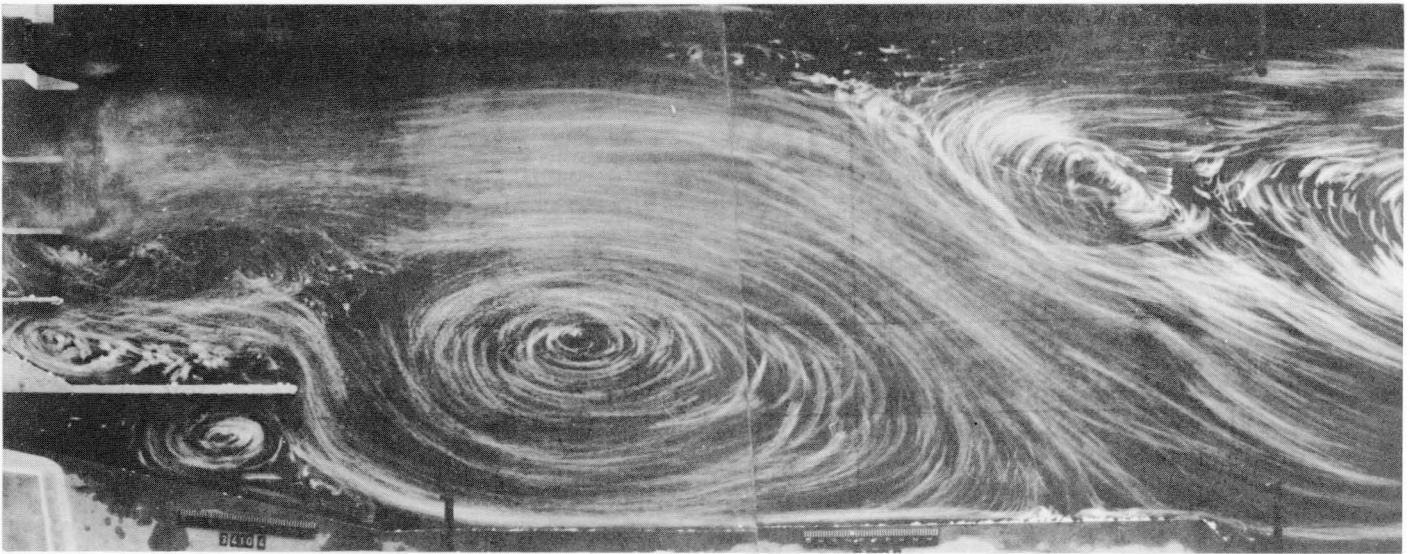
In dem Bestreben, die Kraftwerksbuchten aus Kostengründen möglichst kurz zu halten, wurde das Kraftwasser im Ausgangsentwurf stark umgelenkt, um es wieder dem Gewässerbett zuzuführen (Bilder 2 und 3a). Die Folge hiervon war, daß der Kraftwerksabfluß in einem Winkel von 45° zur Längsachse in das UW eintrat und im Fahrwasser Quergeschwindigkeiten bis zu 80 cm/s erzeugte.

Diese kritische Strömung ließ sich dadurch abstellen, daß die untere Buchtbegrenzung um 30° verschwenkt wurde (Bild 7), was eine Verlängerung der Bucht um etwa 13 m zur Folge hatte. Durch diese relativ geringfügige Änderung der Buchtgeometrie entstand im UW ein vollkommen anderes Walzensystem, welches den Kraftwerksabfluß an das linke Ufer drückte (Bild 3b), so daß im Fahrwasser keine meßbaren Quergeschwindigkeiten mehr registriert wurden. Dieser positive Effekt blieb trotz der folgenden - wegen anderer Abflußzustände erforderlich werdenden - Änderungen am UW erhalten.

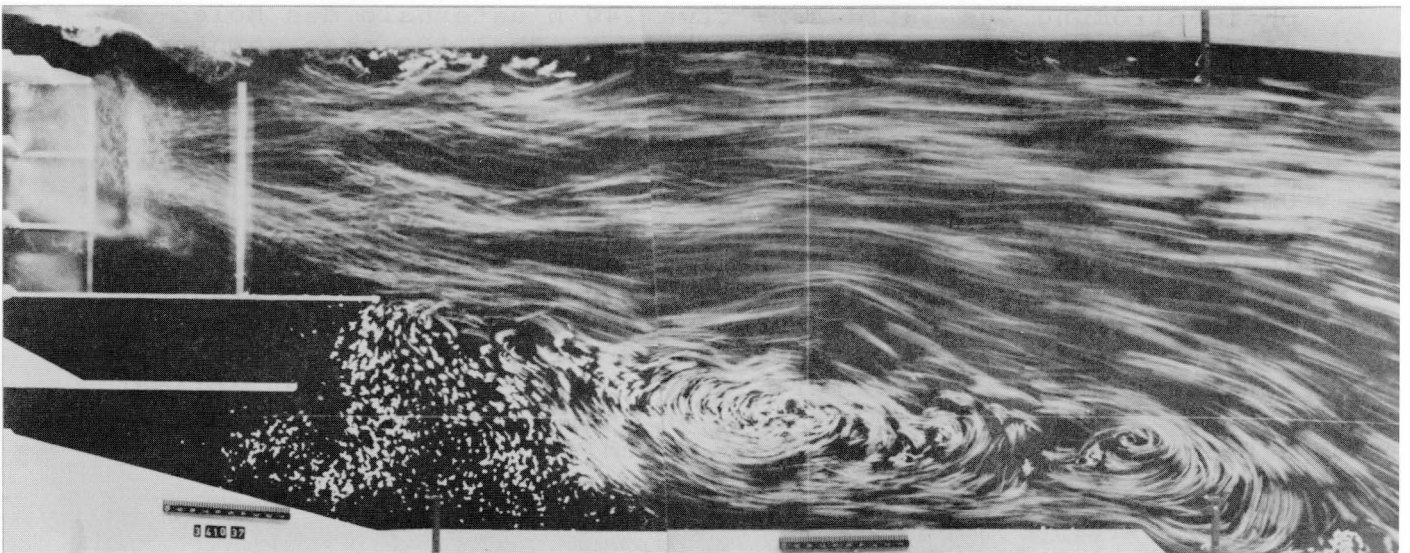
4 Quergeschwindigkeiten bei hohen Wehrabflüssen

Den Versuchen wurde zugrunde gelegt, daß das $HSQ = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ unter drei bzw. zwei (Fall n-1) jeweils um den gleichen Betrag angehobenen Segmentverschlüssen abzuführen und das Kraftwerk geschlossen sei. Bei Beaufschlagung des linken und mittleren Wehrfeldes bildete sich im UW, gemäß Ausgangsentwurf, eine katastrophale Strömung aus (Bild 4a): etwa 140 m unterhalb des Molenkopfes wurden Quergeschwindigkeiten von über 100 cm/s gemessen, unmittelbar vor der Schubmole traten entgegengesetzt gerichtete Quergeschwindigkeiten von etwa 30 cm/s auf und auf der Großschiffahrtsachse herrschte teilweise Rückströmung.

Um annehmbare Schiffahrtsbedingungen zu schaffen, wurden zahlreiche Versuche mit Änderungen in der Uferführung, mit Tieferlegung der UW-Sohle und mit der Anordnung einer Trennmole zwischen Wehrunterwasser und Fahrwasser durchgeführt. Als Ergebnis dieser Untersuchungen und auch der zeitlich parallel laufenden Schleusenentleerversuche wurde die Erstellung einer 102 m, ab Schleuseneinfahrt gerechnet, langen Trennmole empfohlen (Bilder 4b und 7), durch diese Maßnahme wurden die Quergeschwindigkeiten auf den Schiffahrtsachsen unter 30 cm/s gehalten.



a) Ausgangsentwurf des Unterwassers



b) Ausführungsvorschlag des Unterwassers

Bild 4 Beispiel einer Oberflächenströmung bei hohem Wehrabfluß
(je $200 \text{ m}^3/\text{s}$ unter linkem und mittlerem Segment)

5 Quergeschwindigkeiten bei niedrigen Wehrabflüssen

Bei geschlossenen Zugsegmenten wurden Abflüsse über eine oder mehrere gelegte Fischbauchklappen ($72 \text{ m}^3/\text{s}$ je Klappe) mit und ohne Kraftwerksbetrieb untersucht. Wider Erwarten und trotz der langen Trennmole traten z.B. bei einem Gesamtabfluß von nur $132 \text{ m}^3/\text{s}$ in den Vorhafeneinfahrten Quergeschwindigkeiten von 60 und 80 cm/s auf. Verursacht wurde diese mißliche Strömung durch ein Walzensystem, welches den Abflußstrahl an einer seitlichen Ausbreitung hinderte und ihn zudem ins Fahrwasser lenkte.

Aufgrund einer umfangreichen Versuchsreihe mit Grundschnellen, Leitdämmen und Sohlvertiefungen unterhalb des Tosbeckens konnte als Abhilfe eine teilweise Tieferlegung der Sohle um einen Meter und eine zwei Meter hohe Querschwelle nach Bild 7 empfohlen werden. Bei kleinen Saarabflüssen nimmt die Schwelle den halben Abflußquerschnitt ein und bremst so die Walzenbildung in dem Raum zwischen Trennmole und linkem Ufer (Bild 5), so daß der Abflußstrahl sich schon hier ausbreiten kann und an Geschwindigkeit verliert. Die größten Quergeschwindigkeiten überschritten den Wert von 30 cm/s nur unwesentlich.

Ein Wasserspiegelanstieg oberhalb der Schwelle war bei höheren Abflüssen nicht festzustellen, da mit zunehmender Wassertiefe der Einfluß der Grundschwelle zurückging.

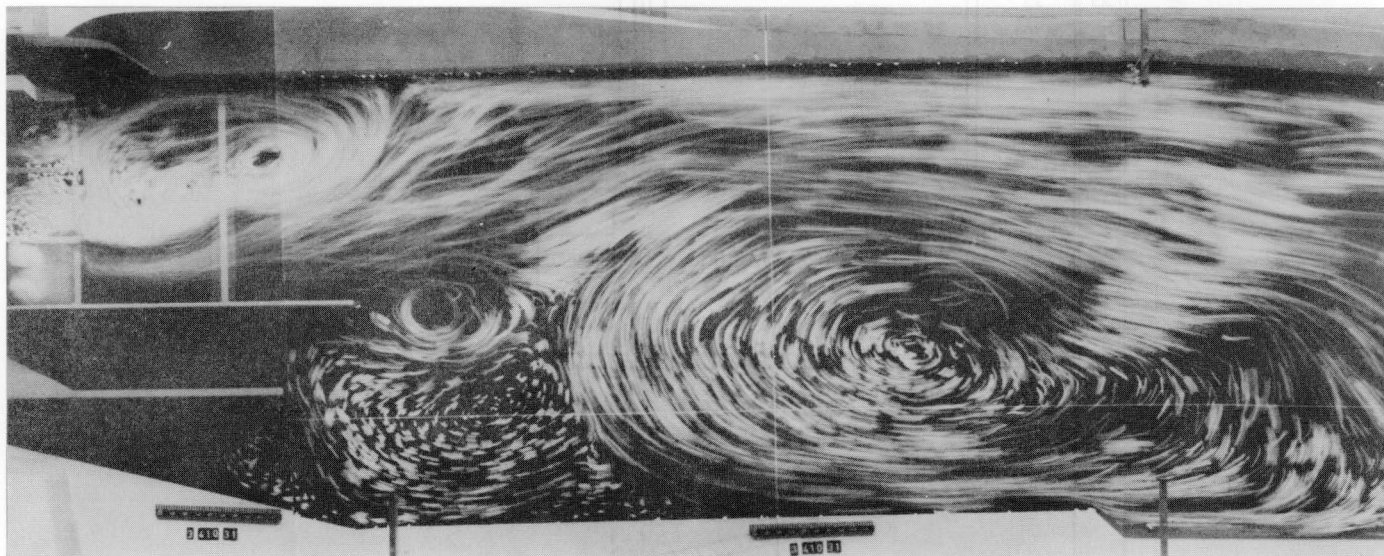


Bild 5 Beispiel einer Oberflächenströmung bei niedrigem Wehrabfluß (Ausführungsvorschlag, $72 \text{ m}^3/\text{s}$ über rechte Klappe)

6 Quergeschwindigkeiten bei Schleusenentleerung

Der Entleerstrom aus der Großschiffahrtsschleuse in das UW erreicht zeitweise eine Stärke von über $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Die durch diesen Abfluß verursachte Strömung in der Einfahrt zum Vorhafen der benachbarten Kleinschiffahrtsschleuse wurde bei hydrostatischem Stau untersucht, d.h. weder das Wehr noch das Kraftwerk leisteten einen Abflußbeitrag.

Durch den Schleusenabfluß wird im UW eine ausgeprägte linksdrehende Walze erregt, welche noch über das Ende der Entleerung hinaus weiterdreht. Lage und Drehgeschwindigkeit dieser Walze konnten durch die bereits in Abschnitt 4 erwähnte Trennmole zwischen Wehrunterwasser und Fahrwasser beeinflusst werden. Wurde

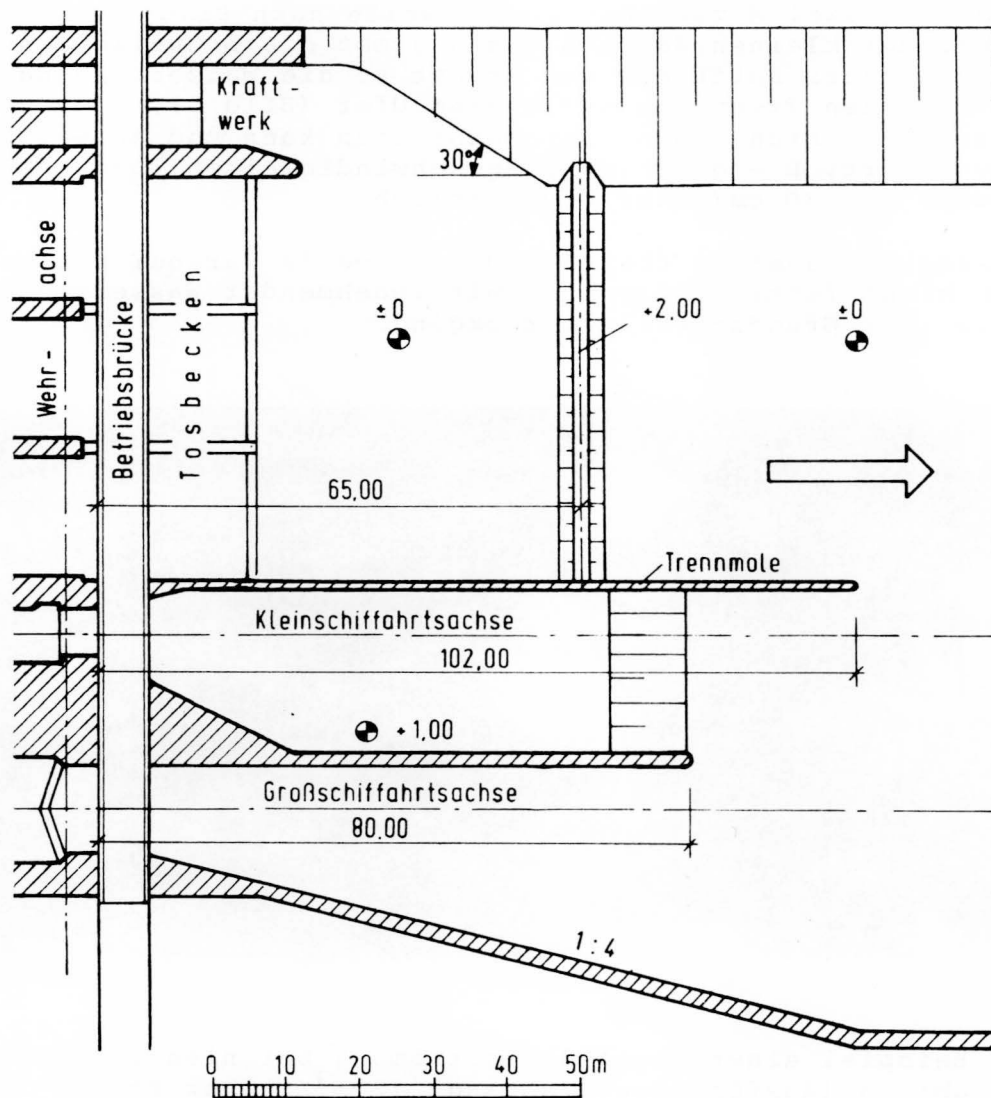
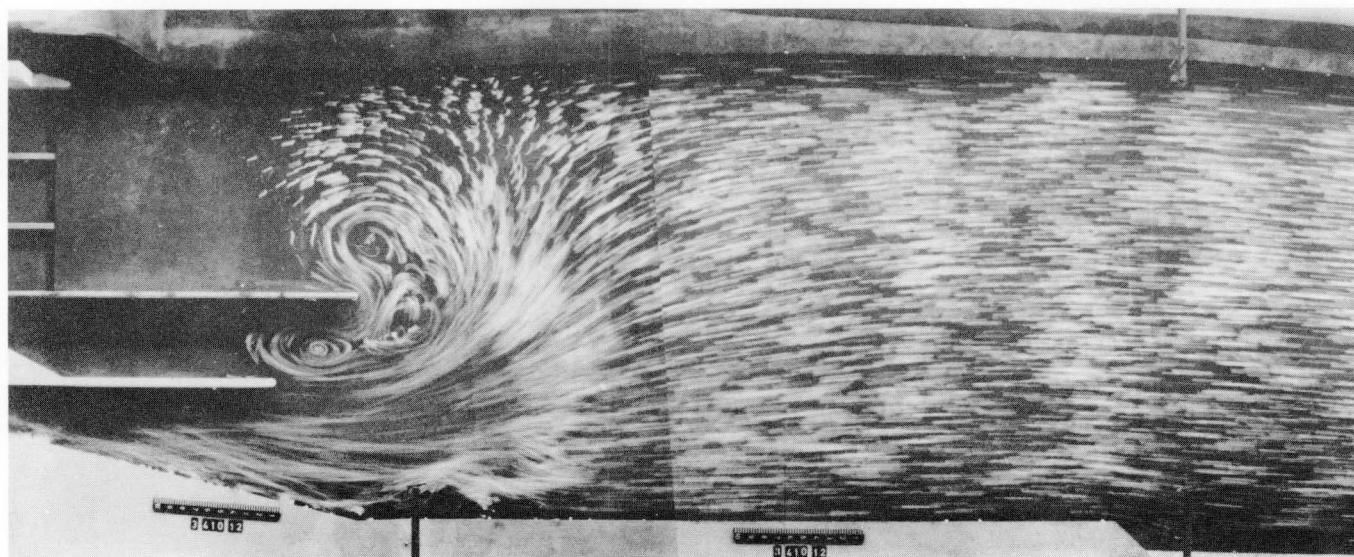


Bild 7 Ausführungsvorschlag für die Gestaltung des Unterwassers



a) Zwischenzustand



b) Ausführungsvorschlag

Bild 6 Oberflächenströmung während einer Schleusenentleerung

diese Mole in der gleichen Länge erstellt wie die Schubmole, so entwickelte sich die Walze bereits mit Erreichen des Abflußmaximums im Entleerstrom (s. Bild 6a), wodurch dieser in seiner Ausbreitung behindert wurde. Über eine Beschleunigung der Walze führte dies zu Quergeschwindigkeiten von 40 cm/s auf der Kleinschifffahrtsachse.

Der Einbau einer 20 m längeren Trennmole (Ausführungsvorschlag) unterband die frühzeitige Walzenbildung (Bild 6b), und die Quergeschwindigkeiten blieben deutlich unter dem Grenzwert von 30 cm/s.

7 Literatur

- /1/ Jambor, F. : Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1960) Heft 15, S. 3 - 13
- /2/ Dietz, J.W. : Modelluntersuchung der Schleusenvorhöfen an der Rheinstaustufe Iffezheim. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1973) Heft 35, S. 90 - 121

Dr. rer. nat. Wolfgang H e i n (BAW)

und

Dr. rer. nat. Karl K l e i n (BfG)

UNTERSUCHUNG ÜBER DEN TEMPE-
RATUREINFLUSS AUF DAS KORROSIONSVER-
HALTEN VON UNGESCHÜTZTEM STAHL
IM EMDER HAFENWASSER

Study in the influence of temperature on the
Corrosion of unprotected steel
within EMDEN harbour water

Inhaltsangabe

Der Einfluß der Temperatur auf die Korrosion von Stahl im Wasser wurde im Emden Hafen untersucht. Es liegt ein stark versalztes, sauerstoffreiches Flußbrackwasser vor (mesohaline Zone). Die Temperaturdifferenz zwischen den Prüfständen betrug etwa 5 K. Nach sechsjähriger Auslagerung wurde im wärmeren gegenüber dem kälteren Wasser eine etwa doppelte Abtragung im Unterwasserbereich ermittelt.

Summary

The influence of temperature on the corrosion of steel in Emden harbour waters has been investigated. The brackish river water is very oversalted and rich in oxygen (mesohaline zone). The difference of temperature between the test racks was about 5 K. After six years of exposition the corrosion rate within the warmer water proved two times bigger than within the colder water.

I N H A L T	Seite
1 Einleitung und Problemstellung	33
2 Grundlagen der Untersuchungen	34
3 Die Auslagerungsstände	35
4 Wasseruntersuchungen	37
5 Temperaturmessungen	42
6 Potentialmessungen	44
7 Bleche	46
7.1 Visueller Befund	46
7.2 Abrostungsprofile	48
8 Diskussion der Ergebnisse	54
9 Schlußbetrachtung	57
10 Schlußfolgerungen	58
11 Literatur	58

1 Einleitung und Problemstellung

Durch den erhöhten Energiebedarf der Wirtschaft und Industrie und dem damit verbundenen Aus- bzw. Neubau von Kraftwerken werden die Flüsse und Wasserstraßen in zunehmendem Umfange zu Kühlzwecken herangezogen. Bereits 1972 wies die Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen der Tagung über "Wasserkraftwerke an den Bundeswasserstraßen" auf die kühlwasserbedingten Temperatursteigerungen in den nächsten Jahren hin. Nach der zu jenem Zeitpunkt vorliegenden Kraftwerksplanung wurden auf Grund von Untersuchungen der BfG für die nächsten 10 bis 20 Jahre mit folgenden Temperatursteigerungen der Flüsse gerechnet:

Mosel	1 K
Rhein	3 - 5 K
Unterweser	3 - 5 K
Unterelbe	3 - 5 K
Donau	6 K
Mittelweser	8 - 10 K
Neckar	10 - 12 K
Saar	10 - 12 K
unterer Main	10 - 12 K

Es mußte davon ausgegangen werden, daß als Folge u.a. sich die Geschwindigkeit von Korrosionsprozessen und mithin auch der Umfang von Korrosionsschäden mit der Zunahme der Wassertemperatur erhöht.

Aus dem Gesichtswinkel einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung interessiert in diesem Zusammenhang einerseits die Frage, welche absolute Höhe der Korrosionsschäden an Stahlbauwerken durch die o.a. Temperaturerhöhungen voraussichtlich erreicht werden kann, und zum anderen, speziell für die WSV, ob Kühlwassereinleiter für zusätzlich verursachte Schäden haftbar gemacht werden sollten.

Dieses Problem spielt auch in anderen Bereichen des Wasserfaches (z.B. bei der Trinkwasserversorgung; erhöhte Korrosion in Rohrnetzen bei künstlich aufgewärmtem Rohwasser) eine wichtige Rolle. Bisher liegen jedoch keine eindeutig klärenden Untersuchungsbefunde vor.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es daher, den Korrosionsabtrag an Stahlblechen in einem natürlichen Wasser, mit unterschiedlichen Temperaturen zu ermitteln.

2 Grundlagen der Untersuchungen

Die Korrosion von Stahl ist ein chemischer bzw. elektrochemischer Vorgang, auf den an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Nach der van't Hoff'schen Regel führt eine Temperaturerhöhung um 10 K zu einer 2 bis 4-fachen Beschleunigung der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit.

Für eine Untersuchung über die Wirkung unterschiedlicher Temperatur auf die Korrosion bot sich der Hafen Emden an. Dieser Hafen ist ein Dockhafen mit einem geringen Süßwasserzulauf. Beim Schleusen tritt Salzwasser in den Hafen ein, so daß eine über das Jahr ungleichmäßige Versalzung des Wassers festzustellen ist.

Eine Skizze des Hafens Emden ist in Bild 1 wiedergegeben.

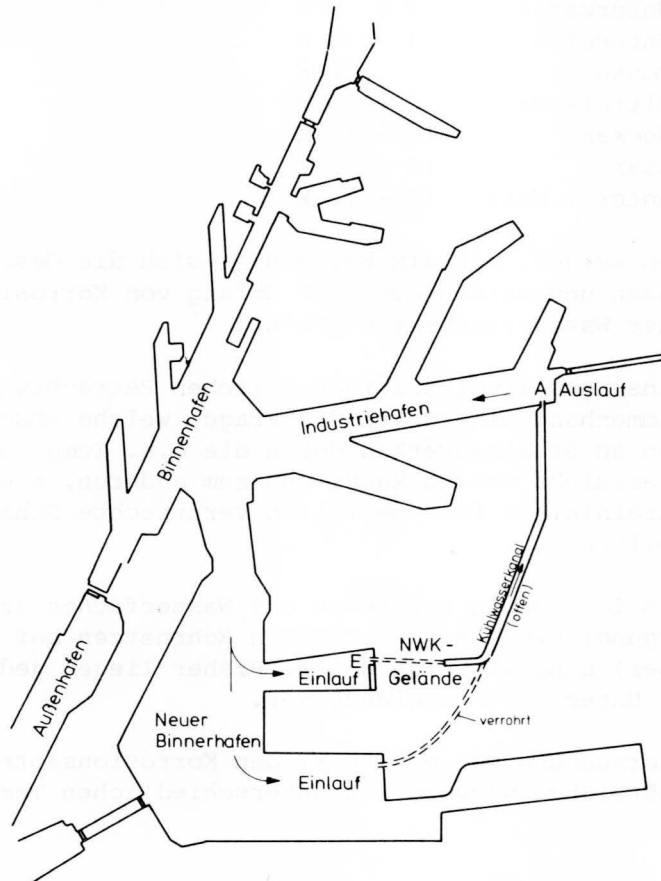


Bild 1 Skizze des Hafens Emden

Aus zwei Hafenbecken des neuen Binnenhafens entnimmt ein Kraftwerk der Nordwestdeutschen Kraftwerke an den in der Skizze mit Einlauf bezeichneten Stellen Kühlwasser. Das benutzte, aufgeheizte Kühlwasser wird in einem offenen Kanal abgeführt, der bei dem in der Skizze angegebenen Auslauf in den Industriebereich eintritt.

Legt man einen Kreislauf zugrunde, so stehen zwischen Auslauf und Einlauf etwa 2,5 km Weg zur Verfügung, auf dem sich das aufgeheizte Wasser abkühlen und mit dem anderen Wasser vermischen kann.

Bei Voruntersuchungen in den Jahren 1971, 1972 und 1973 hatte die WSD Aurich ermittelt, daß nur das Wasser im Industriehafen aufgeheizt wird, die Wassertemperatur im übrigen Hafenbecken sich aber praktisch nicht erhöht.

Nach den hydrochemischen Untersuchungen der BfG handelt es sich um ein mit organischen, schwer abbaubaren Stoffen belastetes aber sauerstoffreiches Fluß-Brackwasser. Aus Analysenergebnissen war zu erkennen, daß wegen des kurzen Weges am Eintritt und Austritt des Kühlwassers ein in etwa gleicher, absoluter Sauerstoffgehalt vorliegt; d.h. der Sauerstoffsättigungsindex ist beim Austritt bei der erhöhten Temperatur größer; während sich die anderen Parameter wie der Salzgehalt nicht verändern.

Da die Wassertemperaturen im Emden Hafen wöchentlich gemessen und durch die BfG regelmäßig alle zwei Monate Wasseranalysen durchgeführt wurden, bot es sich an, Untersuchungen über die Korrosion in Abhängigkeit von der Temperatur durchzuführen, da allein dieser Parameter sich am Ein- und Auslauf ändert.

3 Die Auslagerungsstände

In einer vorhergehenden Untersuchung /1/ war über die Dauer von 12 Jahren die Abrostung an Winkeleisen bestimmt worden, die von der Luftzone bis in den Schlick reichten. Bei zusätzlichen, kleinen, isoliert abgehängten Blechen, zeigte sich eine wesentlich geringere Korrosion.

Wie bereits kurz bemerkt, ist die Korrosion ein elektrochemischer Vorgang. Dabei bilden sich Potentialunterschiede zwischen anodischen und kathodischen Bereichen aus. Durch unterschiedliche Einflüsse wie z.B. Sauerstoffgehalt, Temperatur usw. können bei größeren Stahlteilen über einige Entfernung "Großflächenelemente" entstehen. An kleinen, isolierten Blechen ist hingegen nur die Bildung von Mikroelementen auf der Fläche selbst möglich. Die Korrosion bleibt geringer. Werden jedoch kleine Bleche leitend miteinander verbunden, verstärkt sich die Korrosion.

Aufgrund dieser Ergebnisse gelangten bei den vorliegenden Untersuchungen Bleche zum Einsatz, die von der Luft- bis in die Schlickzone reichten. Die Auslagerungsstände, die in Bild 1 mit E bzw. A gekennzeichnet sind, wurden in unmittelbarer Nähe des Kühlwasserein- bzw. -auslaufs errichtet.

Zur Auslagerung gelangte der im Stahlwasserbau häufig verwendete, unlegierte Stahl St 32, und zwar in Form von Flachstahl 100/8. Dabei mußte gewährleistet sein, daß alle Profile aus einer Charge stammten und unter gleichen Bedingungen gewalzt und weiterverarbeitet wurden, um ein unterschiedliches Korrosionsverhalten auszuschließen. Die benötigten Flachstähle der Abmessungen 6000 x 100 x 8 mm wurden nach dem Entzundern durch Sandstrahlen über die gesamte Länge in ihrer Dicke mit einem Taster mit Meßuhr auf 0,1 mm genau vermessen. Die Messungen ergaben nur geringe Differenzen. An den weitaus meisten Stellen betrug die ermittelte Dicke 8,1 mm, wobei maximale Abweichungen von nur 0,1 mm auftraten.

Zur Befestigung der Bleche wurden Rahmen erstellt, die aus drei Querböhlen (ca. 10 x 10 cm) zwischen zwei Längshölzern bestanden. Über die Befestigungsschrauben gezogene Kunststoffhülsen bzw. Unterlegscheiben verhinderten zwischen den Halteschrauben und Blechen einen metallischen Kontakt und damit Kontaktkorrosion. Die Rahmen mit den befestigten Probeblechen wurden an vorbereiteten, gerammten Pfählen so eingebaut, daß das obere Ende der Bleche um 100 cm über den Hafenwasserspiegel herausragte. Während am Einlauf die Bleche mit einer Gesamtlänge von ca. 6 m eingesetzt werden konnten, mußten sie beim Auslauf gekürzt werden, so daß hier nur eine Gesamtlänge von ca. 4,9 m vorhanden war.

Zur Auslagerung gelangten an jedem Stand jeweils 8 Bleche.

Davon bestanden 4 Bleche aus unbeschichteten Blechstreifen.

3 Probebleche erhielten im Überwasserbereich bis 50 cm unter dem normalen Wasserstand eine Beschichtung aus Teerepoxid. Bei beiden Serien wurde an je einem Blech eine Kontaktbuchse befestigt, so daß es leicht möglich war, mit einer Kupfer/Kupfersulfat-Meßsonde die auftretenden Potentiale über die Eintauchtiefe zu messen.

Letztlich war eine Probe in 3 Teile geteilt und untereinander mit nur geringen Zwischenräumen angeordnet. An den einzelnen Teilblechen waren mit Teerepoxid versiegelte Leitungen (Verhinderung von Kontaktkorrosion) angebracht, die über Wasser in Buchsen endeten. Durch Kurzschluß ließen sich die Blechteile miteinander verbinden, so daß die gleiche Korrosion wie an ungeteilten Blechen erwartet werden konnte. Zur Potentialmessung sollten die einzelnen Teile elektrisch getrennt werden, damit die Potentialverteilung über die verschiedenen Tiefen besser erfaßt werden konnte als bei ungeteilten Blechen.

Leider war bereits nach ca. einem Viertel-Jahr der Stand am Kühlwasserauslauf durch ein Schiff beschädigt worden, wobei das mittlere und untere Blech verloren gingen. Als Folge kann an dieser Stelle nur die Korrosion der obersten Bleche verfolgt werden.

4 Wasseruntersuchungen

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde führt im Ems-Ästuar in einem Zyklus von 2 Monaten hydrochemische Untersuchungen durch. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden über die Berichtszeit unmittelbar an den Auslagerungsständen, d.h. am Ein- und Auslauf des Kühlwassers Wasserproben entnommen und analysiert. Ursprünglich war vorgesehen, die Wasserproben aus drei Tiefen, und zwar 0,5 m unter der Wasseroberfläche, in der Mitte und 1 m über Grund zu ziehen. Wie sich jedoch aus den Analysenprotokollen ersehen ließ, wurden praktisch über alle Tiefen gleiche Ergebnisse erhalten; demnach ändert sich das jeweilige Hafenwasser über die Tiefe in seiner Zusammensetzung nahezu nicht.

Aufgrund dieser Ergebnisse konnte bei den späteren Untersuchungen auf das aufwendige Verfahren verzichtet und nur noch auf die Analyse einer Probe aus mittlerer Tiefe, und zwar beim Kühlwassereinlauf aus 2,5 m beim Auslauf aus 1,5 m Tiefe beschränkt werden.

Werden die über die einzelnen Jahre ermittelten Analysenwerte tabellarisch zusammengefaßt und dabei die Proben eines Termins vom Kühlwassereinlauf und -auslauf nebeneinandergestellt, so läßt sich leicht erkennen, daß außer der Temperatur und dadurch bedingt den Sauerstoffsättigungsindex sich alle übrigen Werte zwischen Kühlwassereinlauf und -auslauf nur wenig unterscheiden. Es erscheint daher gerechtfertigt, bei den folgenden Abbildungen über Analysenergebnisse außer bei dem Sauerstoffsättigungsindex und der Temperatur nur die Werte eines Standes heranzuziehen.

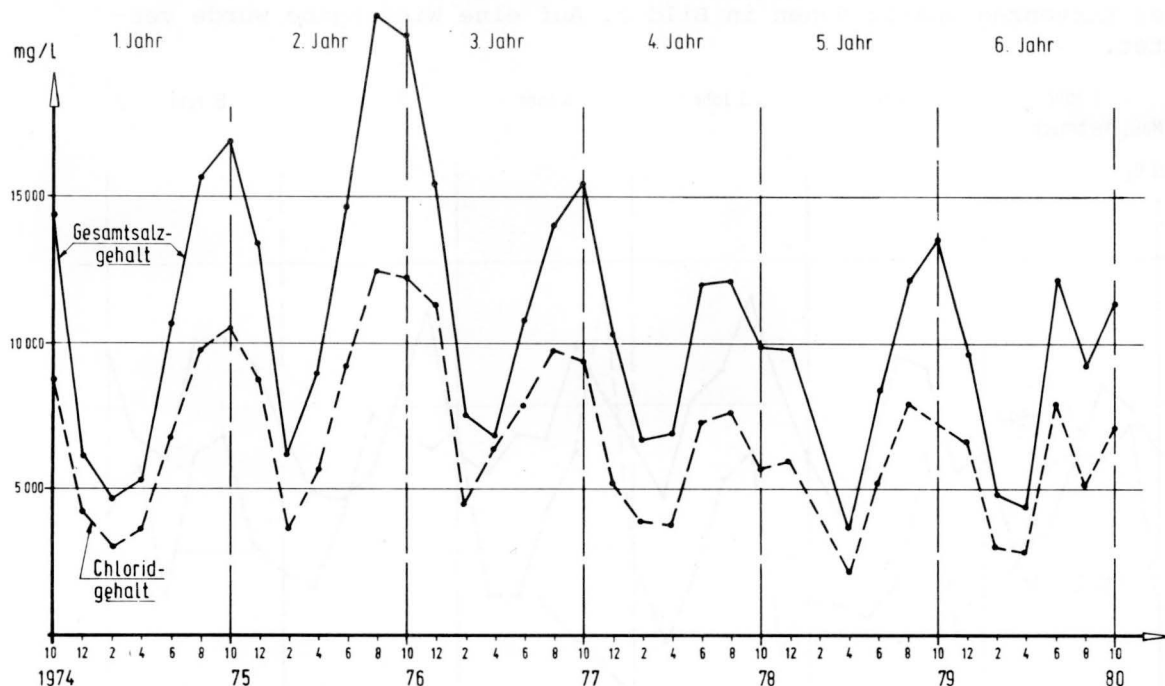


Bild 2 Glührückstand der gelösten Stoffe (Gesamtsalzgehalt) und Chloridgehalt

In Bild 2 ist der Verlauf der Konzentration des Glührückstandes über die Auslagerungsjahre aufgezeichnet. Der Glührückstand der gelösten Stoffe kann praktisch dem Gesamtsalzgehalt gleichgesetzt werden, obwohl die Werte etwas zu niedrig liegen, hervorgerufen durch den Verlust von Kohlensäure usw. beim Glühen. Die zum Teil sehr hohen Werte des Glühverlustes deuten jedoch darauf hin, daß bei den gelösten Stoffen in größerem Umfang organische Substanz vorliegt, die sich ebenfalls verflüchtigt. Eine Berücksichtigung der gelösten Stoffe als Gesamtsalzgehalt würde demnach den wahren Wert des Salzgehaltes wesentlich stärker verfälschen. Da der weitaus größte Anteil der Salze Chloride sind, wurde die Konzentration des Chloridgehaltes ebenfalls in Bild 2 eingetragen. Wie ersichtlich laufen beide Kurvenzüge praktisch parallel.

Im äußeren Erscheinungsbild wiederholen sich die Jahresrhythmen. Ein starkes Absinken der Salzkonzentration ist jeweils im Winter (Messungen Februar bis April) zu verzeichnen. Die höchsten Salzgehalte werden hingegen im Sommer (Messung August bis Oktober) gefunden. Offensichtlich wirken sich die Klimabedingungen der einzelnen Sommer aus. So macht sich der heiße und trockene Sommer 1976 durch eine wesentlich höhere Salzkonzentration bemerkbar als die kühlen und feuchten Sommer 1978 und 1980.

Im allgemeinen bewegen sich die Konzentrationsschwankungen im Bereich des Salzgehaltes der mesohalinen Zone (Flußbrackwasser) mit 5 bis 18 ‰. Extremwerte reichen jedoch bis in die polyhaline Zone (Küstenbrackwasser) mit 18 bis 30 ‰ bzw. oligohaline Zone (schwach versalztes Flußwasser) mit 0,5 bis 5 ‰ Salz.

Da die elektrische Leitfähigkeit abhängig vom Salzgehalt ist, verläuft dieser Kurvenzug analog denen in Bild 2. Auf eine Wiedergabe wurde verzichtet.

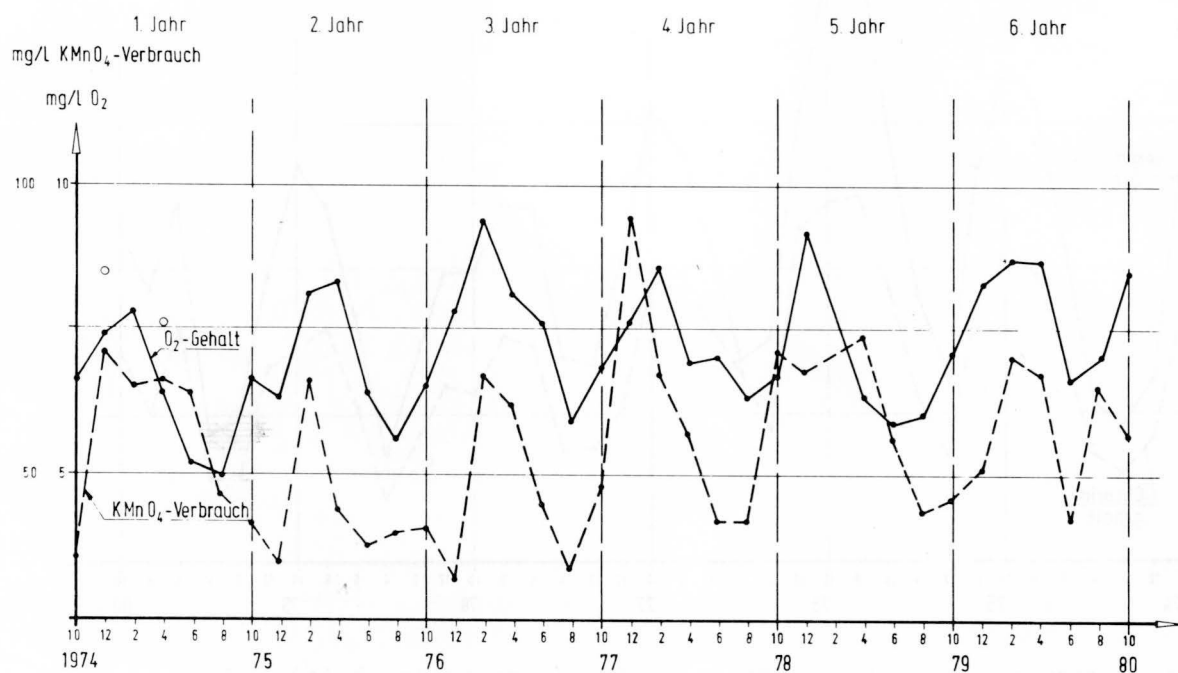


Bild 3 Sauerstoffgehalt und KMnO₄ - Verbrauch

Die Kurven des Sauerstoffgehaltes und des Kaliumpermanganatverbrauchs, die in Bild 3 wiedergegeben sind, weisen, wenn sie auch nicht parallel verlaufen, gleichen Trend auf. Der Wassertemperatur und damit der Löslichkeit entsprechend ist in den kalten Jahreszeiten der absolute Sauerstoffgehalt am größten, in den warmen Jahreszeiten am geringsten. Der Kaliumpermanganatverbrauch und ebenso der BSB₅, der wegen des analogen Verlaufs hier nicht wiedergegeben ist, weisen den gleichen Trend auf: im Sommer die niedrigsten, im Winter die höchsten Werte.

Der Sauerstoffsättigungsindex ist das Verhältnis des absolut vorhandenen Sauerstoffs zu dem Gehalt, der bei der jeweiligen Temperatur in dem gesättigten Wasser vorliegt; er wird in % ausgedrückt. Die Kurven des Sauerstoffsättigungsindex in Bild 4 schwanken stark, weisen aber, soweit ersichtlich, keine Beziehungen zur Jahreszeit auf.

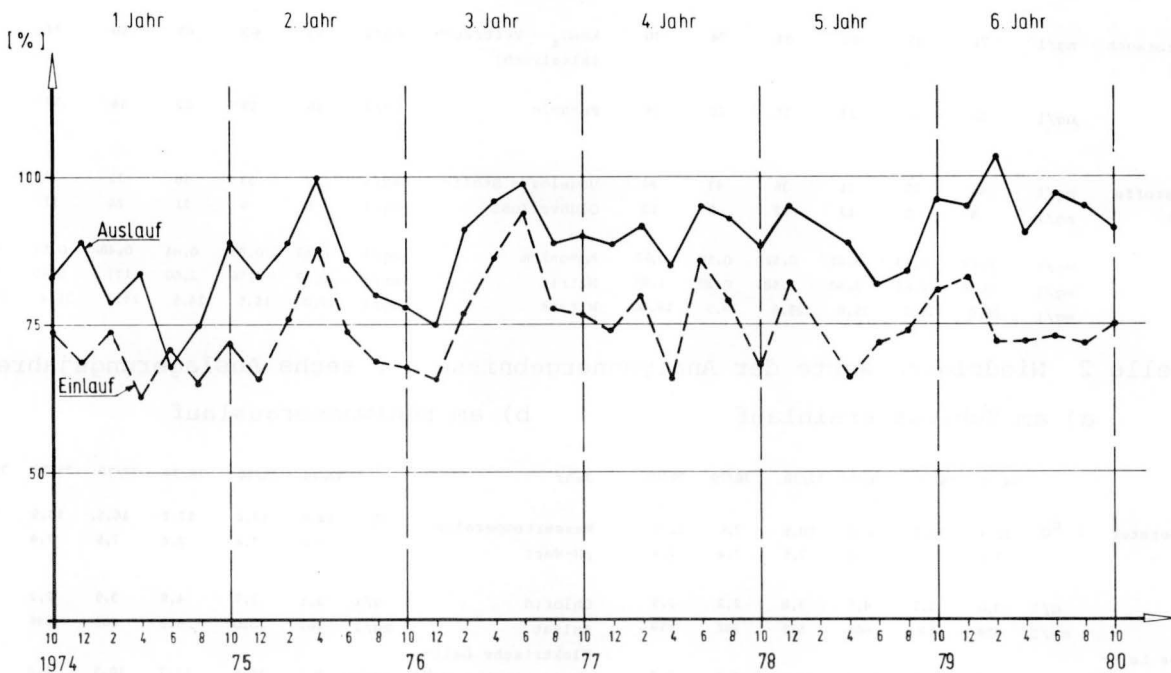


Bild 4 Sauerstoffsättigungsindex

Um die absoluten Werte besser vergleichen zu können, sind in Tabelle 1 die jeweils höchsten, in Tabelle 2 die jeweils niedrigsten Werte der einzelnen Jahre, in Tabelle 3 die Jahresmittelwerte wiedergegeben und in Tabelle 4 die über die sechs Auslagerungsjahre gemittelten Analyseergebnisse am Kühlwassereinlauf und -auslauf gegenübergestellt.

Daraus ist ersichtlich, daß außer bei der Temperatur und daraus folgernd dem Sauerstoffsättigungsindex zwischen Kühlwassereinlauf und -auslauf keine gravierenden Unterschiede gefunden werden. Man kann daher davon ausgehen, daß an beiden Auslagerungsständen vom Korrosionsmedium her gleiche Bedingungen vorliegen und für unterschiedliche Korrosion nur die Temperaturdifferenz bzw. davon abhängige Parameter verantwortlich sind.

Tabelle 1 Höchstwerte der Analysenergebnisse der sechs Auslagerungsjahre

a) am Kühlwassereinlauf								b) am Kühlwasserauslauf							
Jahr		74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	Jahr		74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80
Wassertemperatur	°C	25,1	24,4	24,9	23,2	23,0	22,8	Wassertemperatur	°C	30,5	27,1	29,8	28,3	28,7	28,4
pH-Wert		7,8	7,8	7,9	8,0	7,7	7,7	pH-Wert		7,8	7,8	7,9	7,9	7,7	7,8
Chlorid	g/l	10,5	12,5	9,8	7,6	8,6	7,9	Chlorid	g/l	10,7	12,8	10,0	7,6	8,6	8,0
Sulfat	mg/l	1837	1800	1348	1041	1130	1017	Sulfat	mg/l	1851	2010	1335	1055	1200	1008
Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	mS/cm	24,5	29,0	24,7	19,2	22,0	19,2	Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	mS/cm	24,5	29,0	25,0	19,4	22,0	19,5
Carbonathärte	°d	7,6	7,6	7,6	7,3	7,3	7,0	Carbonathärte	°d	7,8	7,6	7,3	7,6	7,3	7,0
Gesamthärte	°d	190	285	183	138	153	139	Gesamthärte	°d	190	283	175	137	154	142
Gelöste Stoffe	mg/l	19620	25038	19230	15810	18090	14644	Gelöste Stoffe	mg/l	19214	25875	19272	15330	18130	14480
Glührückstand	mg/l	16767	21159	15430	12123	13570	12120	Glührückstand	mg/l	16783	21016	16911	12071	13560	12190
Sauerstoff	mg/l	7,8	8,3	9,4	8,6	9,2	8,7	Sauerstoff	mg/l	8,5	8,3	9,3	8,7	8,9	9,6
Sauerstoffsättigungsindex	o/o	74	88	94	86	82	85	Sauerstoffsättigungsindex	o/o	89	100	99	95	95	103
KMnO ₄ - Verbrauch (alkalisch)	mg/l	71	61	67	94	74	70	KMnO ₄ - Verbrauch (alkalisch)	mg/l	73	63	69	90	74	72
Phenole	µg/l	16	20	13	11	18	16	Phenole	µg/l	16	19	13	16	17	17
Ungelöste Stoffe	mg/l	46	25	31	36	43	34	Ungelöste Stoffe	mg/l	47	33	38	33	37	30
Glühverlust	mg/l	8	5	12	12	9	13	Glühverlust	mg/l	8	6	11	24	11	10
Ammonium	mg/l	0,69	0,93	0,87	0,52	0,58	0,62	Ammonium	mg/l	0,67	0,83	0,84	0,48	0,84	0,58
Nitrit	mg/l	0,46	2,65	2,50	1,58	0,38	1,95	Nitrit	mg/l	0,42	2,76	2,60	177	0,40	1,70
Nitrat	mg/l	16,9	15,5	25,8	25,6	29,5	18,30	Nitrat	mg/l	17,0	15,5	24,5	24,3	31,4	21,0

Tabelle 2 Niedrigste Werte der Analysenergebnisse der sechs Auslagerungsjahre

a) am Kühlwassereinlauf								b) am Kühlwasserauslauf							
Jahr		74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	Jahr		74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80
Wassertemperatur	°C	10,4	10,3	6,8	10,5	7,6	11,5	Wassertemperatur	°C	14,5	17,4	13,2	16,5	14,9	17,4
pH-Wert		7,6	7,5	7,4	7,5	7,4	7,4	pH-Wert		7,6	7,4	7,4	7,5	7,4	7,3
Chlorid	g/l	3,0	3,7	4,5	3,8	2,2	2,9	Chlorid	g/l	3,1	3,7	4,8	3,9	2,2	2,9
Sulfat	mg/l	458	1130	605	572	342	358	Sulfat	mg/l	467	1010	618	601	346	383
Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	mS/cm	8,0	10,4	11,1	10,4	6,1	7,7	Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	mS/cm	8,2	10,6	11,7	10,5	6,4	7,8
Carbonathärte	°d	6,1	5,6	5,9	5,3	4,8	4,8	Carbonathärte	°d	6,3	5,8	5,6	5,3	5,0	4,8
Gesamthärte	°d	59	76	82	78	43	54	Gesamthärte	°d	58	77	84	76	46	56
Gelöste Stoffe	mg/l	5860	7130	8519	8200	4383	5220	Gelöste Stoffe	mg/l	5930	7320	10425	8240	4636	5223
Glührückstand	mg/l	4660	6210	6874	6740	3600	4381	Glührückstand	mg/l	4930	6370	7055	6870	3808	4521
Sauerstoff	mg/l	5,0	5,6	5,9	6,3	5,9	6,6	Sauerstoff	mg/l	5,2	6,3	6,2	6,9	6,1	7,1
Sauerstoffsättigungsindex	o/o	63	66	66	66	72	82	Sauerstoffsättigungsindex	o/o	68	78	75	85	82	90
KMnO ₄ - Verbrauch (alkalisch)	mg/l	42	35	32	42	44	42	KMnO ₄ - Verbrauch (alkalisch)	mg/l	42	36	35	42	46	44
Phenole	µg/l	9	11	6	4	7	7	Phenole	µg/l	9	36	6	4	7	7
Ungelöste Stoffe	mg/l	10	6	10	7	10	6	Ungelöste Stoffe	mg/l	10	9	17	10	14	15
Glühverlust	mg/l	1	1	2	3	2	2	Glühverlust	mg/l	3	1	3	3	2	4
Ammonium	mg/l	0,07	0,03	0,09	0,08	0,12	0,04	Ammonium	mg/l	0,07	0,04	0,09	0,08	0,06	0,01
Nitrit	mg/l	0,31	0,13	0,10	0,10	0,03	0,12	Nitrit	mg/l	0,30	0,11	0,05	0,08	0,03	0,11
Nitrat	mg/l	7,0	5,2	9,4	11,3	11,5	12,0	Nitrat	mg/l	6,3	5,6	9,2	11,3	11,4	12,5

Tabelle 3 Mittelwerte der Analysenergebnisse der sechs Auslagerungsjahre

a) am Kühlwassereinlauf								b) am Kühlwasserauslauf							
Jahr		74/75	75/76	76/77	77/78	78/79 ^{*)}	79/80	Jahr		74/75	75/76	76/77	77/78	78/79 ^{*)}	89/80
Wassertemperatur	°C	17,5	16,7	15,9	15,5	17,2	15,2	Wassertemperatur	°C	22,2	22,6	21,8	21,0	23,0	21,0
pH-Wert		7,8	7,7	7,6	7,7	7,6	7,6	pH-Wert		7,8	7,6	7,6	7,7	7,6	7,6
Chlorid	g/l	6,3	8,7	7,8	5,6	6,0	5,1	Chlorid	g/l	6,4	8,8	8,0	5,6	6,1	5,9
Sulfat	mg/l	1013	1511	1022	823	746	711	Sulfat	mg/l	1018	1502	1033	856	851	743
Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	mS/cm	15,1	20,9	18,9	14,8	15,3	13,5	Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	mS/cm	15,2	21,1	19,2	14,6	15,8	14,0
Carbonathärte	°d	7,0	6,9	6,8	6,3	6,5	6,3	Carbonathärte	°d	7,1	6,6	6,7	6,5	6,6	6,2
Gesamthärte	°d	116	168	142	108	106	98	Gesamthärte	°d	116	185	144	108	111	102
Gelöste Stoffe	mg/l	11674	16784	14221	11347	11803	10254	Gelöste Stoffe	mg/l	11612	17184	15105	11278	12304	10569
Glührückstand	mg/l	9866	14138	11850	9523	9482	8488	Glührückstand	mg/l	9929	14286	12156	9388	9693	8821
Sauerstoff	mg/l	6,4	7,0	7,6	7,2	6,9	8,0	Sauerstoff	mg/l	6,8	7,2	7,6	7,7	7,3	8,1
Sauerstoffsättigungsindex	°/o	69	74	80	76	75	83	Sauerstoffsättigungsindex	°/o	81	86	90	90	89	95
KMnO ₄ - Verbrauch (alkalisch)	mg/l	59	43	48	62	58	58	KMnO ₄ - Verbrauch (alkalisch)	mg/l	61	45	50	62	58	60
Phenole	µg/l	12	15	9	8	12	14	Phenole	µg/l	12	15	9	8	12	12
Ungelöste Stoffe	mg/l	31	12	21	16	19	14	Ungelöste Stoffe	mg/l	29	20	27	23	24	22
Glühverlust	mg/l	5	2	6	6	4	6	Glühverlust	mg/l	5	4	6	10	4	6
Ammonium	mg/l	0,34	0,43	0,42	0,23	0,32	0,23	Ammonium	mg/l	0,35	0,41	0,38	0,19	0,33	0,10
Nitrit	mg/l	0,38	0,66	0,59	0,70	0,18	0,75	Nitrit	mg/l	0,36	0,68	0,57	0,61	0,18	0,69
Nitrat	mg/l	12,3	9,9	14,8	18,7	17,3	16,6	Nitrat	mg/l	12,1	10,1	14,5	17,7	13,6	17,0

*) 1978/79 aus 5

in den übrigen Jahren je 6 Probenahmen

*) 1978/79 aus 5

in den übrigen Jahren 6 Probenahmen

Tabelle 4 Gegenüberstellung der Mittelwerte der Analysenergebnisse über sechs Auslagerungsjahre am Kühlwassereinlauf und -auslauf

		E	A	Differenz		E	A	Differenz
Wassertemperatur	°C	16,3	21,9	5,6	Sauerstoff	mg/l	7,2	7,5 0,3
pH-Wert		7,7	7,7	0	Sauerstoffsättigungsindex	°/o	76	89 13
Chlorid	g/l	6,6	6,8	0,2	KMnO ₄ - Verbrauch (alkalisch)	mg/l	55	56 1
Sulfat	mg/l	971	1001	30	Phenole	µg/l	12	11 1
Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	mS/cm	16,4	16,7	0,3	Ungelöste Stoffe	mg/l	19	24 5
Carbonathärte	°d	6,6	6,6	0	Glühverlust	mg/l	5	6 1
Gesamthärte	°d	123	128	5	Ammonium	mg/l	0,33	0,29 0,04
Gelöste Stoffe	mg/l	12681	13009	320	Nitrit	mg/l	0,53	0,51 0,02
Glührückstand	mg/l	10558	10712	154	Nitrat	mg/l	14,9	14,8 0,01

Für den Glühverlust der gelösten Stoffe, der in etwa als ein Maß für filtrierbare organische Substanz gelten kann, fällt auf, daß er in den meisten Fällen am Kühlwasserauslauf höher ist als am Kühlwassereinlauf. Das läßt vermuten, daß demnach im Bereich des wärmeren Wassers ein höherer Gehalt an organischer Substanz vorhanden ist als im kühleren Teil des Hafens.

Im übrigen erscheint für das Wasser noch bemerkenswert, daß das Verhältnis Chlorid zu Sulfat nicht konstant ist, sondern z.B. bei den Jahresmittelwerten zwischen 5,76 : 1 und 8,04 : 1 schwankt.

5 Temperaturmessungen

Wie bereits erwähnt, hat das WSA Emden die Temperatur des Emden Hafengewässers bis Ende 1979 wöchentlich und anschließend vierzehntägig gemessen, und zwar jeweils an der Oberfläche, in mittlerer Tiefe und über der Sohle.

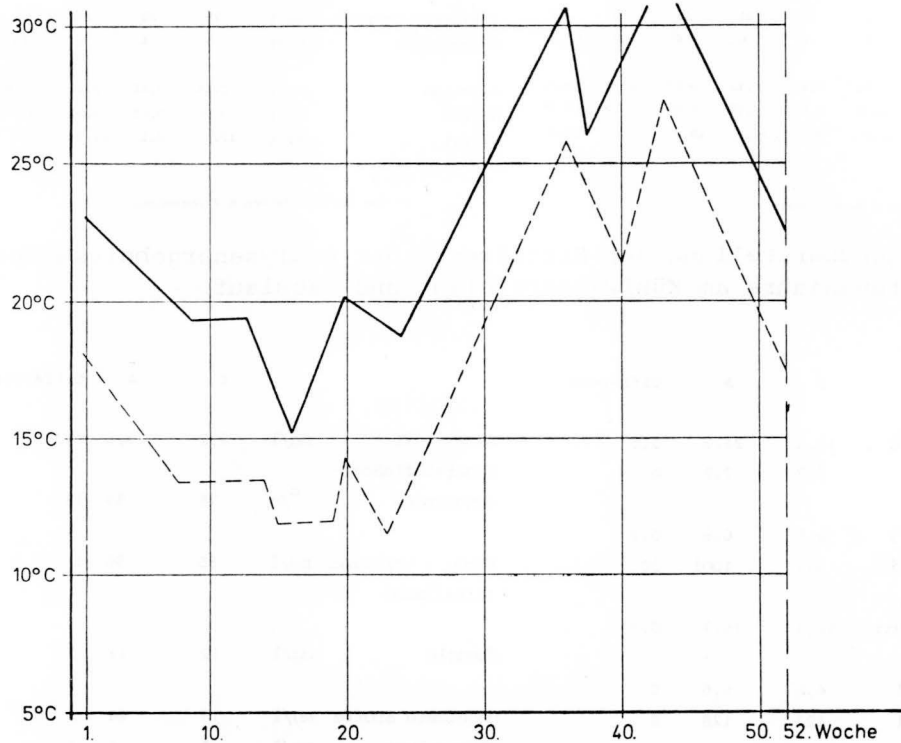


Bild 5 Temperaturverlauf am Kühlwassereinlauf und -auslauf im 1. Jahr

Eine genaue Wiedergabe des Kurvenverlaufs wäre zu unübersichtlich. In Bild 5 sind die Temperaturen des 1. Jahres so gemittelt, daß der jahreszeitlich bedingte Temperaturverlauf als Trend herausgestellt wird. Wie ersichtlich und zu erwarten, zeigen die Temperaturkurven am Kühlwasser-einlauf und -auslauf einen annähernd parallelen Verlauf. Ähnlich verhalten sich die Kurven der anderen Jahre.

Tabelle 5 Extrem-, Mittel- und Differenzwerte der Temperaturen in °C

	74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	74-80
Einlauf							
Minimaltemperatur	11,3	8,7	3,6	9,5	1,3	5,0	
Maximaltemperatur	27,3	24,8	24,9	23,9	23,9	23,1	
mittlere Temperatur	17,7	17,3	15,3	16,2	14,6	13,6	15,8
Auslauf							
Minimaltemperatur	15,1	14,1	9,2	13,3	5,7	10,4	
Maximaltemperatur	31,9	28,8	29,2	28,1	29,0	27,7	
mittlere Temperatur	23,1	21,9	20,0	21,1	19,2	17,7	20,5
Differenz							
Einlauf - Auslauf							
minimal	2,3	1,5	2,3	2,2	2,0	1,3	
maximal	7,5	8,5	9,3	7,9	7,0	6,1	
mittel	5,4	4,7	4,6	4,9	4,6	4,1	4,7
Mittelwerte gebildet							
aus () Wochen	(52)	(51)	(51)	(52)	(50)	(26)	

In Tabelle 5 sind die Jahresextrem-, -mittel- und -differenzwerte der sechs Auslagerungsjahre eingetragen. Auffallend ist, daß die Minimaltemperaturen sehr schwanken. Demgegenüber sind die Maximaltemperaturen stark nivelliert, wenn man vom ersten Auslagerungsjahr absieht. Während an der Kühlwassereinleitung in den Hafen im ersten Jahr eine maximale Temperatur von ca. 32° C gemessen wurde, liegt sie in den übrigen Jahren um bzw. unter 29° C. Die Kühlwasserabgabe des Kraftwerks wird inzwischen so gesteuert, daß im Hafenwasser die gesetzte obere Grenze von 30° C unterschritten bleibt.

Die mittlere Jahrestemperatur liegt auch am Kühlwassereinlauf mit $15,8^{\circ}\text{C}$ deutlich höher als in einem unbeeinflussten Gewässer. Zum Auslauf beträgt die mittlere Differenz $4,7\text{ K}$.

Für die Auswertung der temperaturabhängigen Korrosion kann demnach mit einer Temperaturdifferenz zwischen den beiden Ständen von annähernd 5 K gerechnet werden, wobei aber auf die insgesamt verhältnismäßig hohe Temperatur des Hafenwassers hingewiesen werden muß.

6 Potentialmessungen

Wie bereits erwähnt, wurden an jedem Stand ein Teil der Bleche für die Messung der auftretenden Potentiale eingerichtet. Diese Messungen führte das WSA Emden, Aufsichtsbezirk Neuer Binnenhafen mit einer Kupfer/Kupfersulfat (Cu/CuSO_4) Meßelektrode und einem analoganzeigenden Spannungsmeßgerät durch.

Wenngleich die Potentiale leider nicht sehr gleichmäßig und kontinuierlich über die Zeit verteilt bestimmt wurden, so lassen sich doch einige Tendenzen erkennen.

Da die Potentiale der verschiedenen Bleche sich nur wenig unterscheiden,

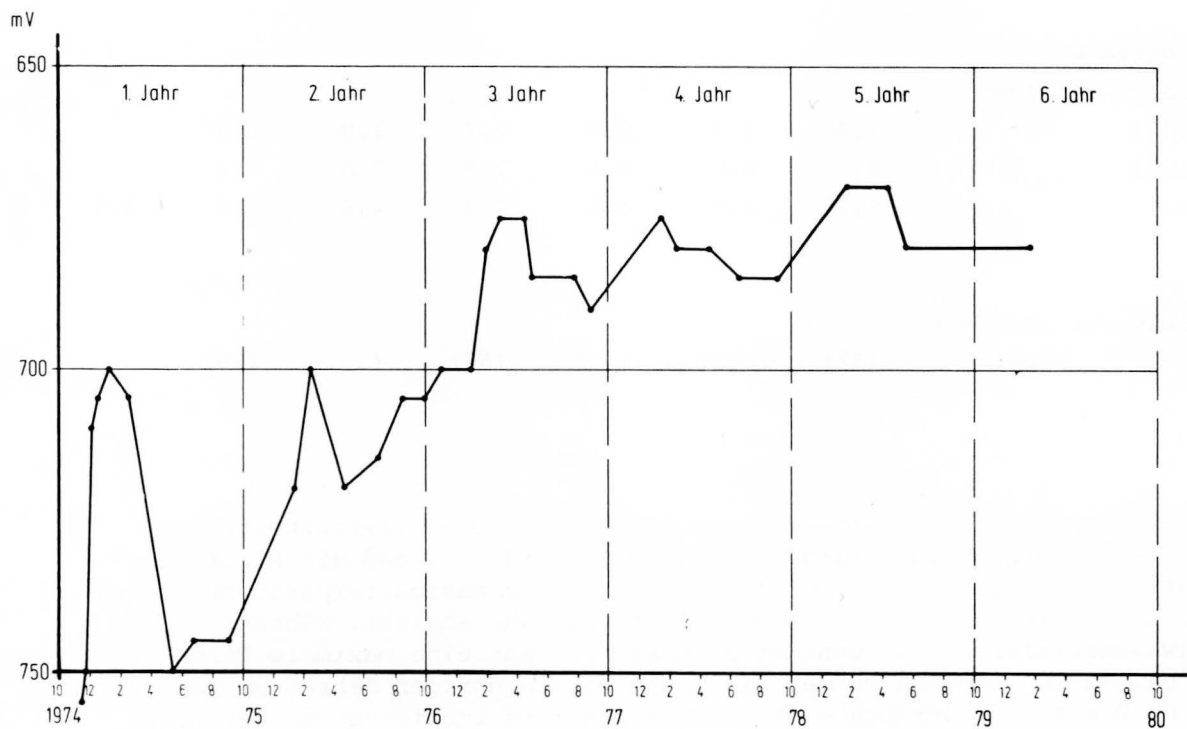


Bild 6 Potential gemessen gegen Cu/CuSO_4 - Elektrode

sind in Bild 6 die Mittelwerte des unbeschichteten Bleches des Standes am Kühlwassereinlauf eingezeichnet. Kurz nach der Auslagerung ergab die erste Potentialmessung einen Wert von ca. - 750 mV gegen Cu/CuSO₄. Wenn man von den Schwankungen innerhalb der einzelnen Jahre absieht, auf die später noch eingegangen wird, steigt das Potential kontinuierlich an und erreicht im dritten Jahr mit ca. - 670 bis - 680 mV gegen Cu/CuSO₄ einen Wert, der dem in der Literatur mit ca. - 650 mV als Mittelwert angegebenen Ruhepotential eines unlegierten Stahls entspricht. Dieser Kurvenverlauf deutet darauf hin, daß eine frisch gestrahlte Stahloberfläche stark korrosionsaktiv ist. Mit der Zeit verändert sich diese Oberfläche durch Korrosionsprodukte, Bewuchs usw., so daß sie edler wird.

Die allgemein stärkere Anfangskorrosion läßt sich demnach u.a. mit dem unedleren Charakter der frischen gegenüber der gealterten Stahloberfläche erklären.

Auch bei der vorliegenden Potentialkurve finden sich Jahresrhythmen. So werden in jedem Jahr etwa im Februar bis April die positivsten, im Juni bis August die negativsten Werte ermittelt. Das entspricht in etwa dem Sauerstoffgehalt (siehe Bild 3). Wenn die übrigen Parameter konstant bleiben, führt nach dem Strom-Spannungsdiagramm ein niedriger Sauerstoffgehalt zu geringerer Korrosion und Verschiebung des Ruhepotentials zu negativeren Werten bzw. umgekehrt.

Aber auch die Salzkonzentration und die Temperatur weisen zu den Zeiten der Maxima bzw. Minima ihre jährlichen Extremwerte auf.

Es erscheint im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht angezeigt, das Zusammenspiel der einzelnen Faktoren auf die Ausbildung des Potentials zu untersuchen. Auch aus dem Vergleich der Meßwerte untereinander lassen sich einige Schlüsse ziehen.

Vorab sei jedoch zur Klarstellung eine Bemerkung gemacht. Die Ablesegenauigkeit am verwendeten analoganzeigenden Spannungsmeßgerät beträgt etwa 5 mV. Wenn demnach bei einer Ablesung eine Differenz von + 5 mV auftritt, so liegt diese innerhalb der Fehlergrenzen; wenn jedoch bei wiederholten Messungen immer wieder gleiche Ergebnisse erhalten werden, so deutet das zumindest auf einen Trend. Im folgenden sind die Mittelwerte der Potentialmessungen vom 07.03.77 also dem Zeitpunkt an, an dem das Potential zwischen - 670 bis - 680 mV gegen Cu/CuSO₄ liegt (siehe Bild 5), bis zum Ende der Messungen am 28.01.80 niedergelegt. Die übergenaue Berechnung wurde mit Absicht durchgeführt, um den jeweiligen Trend besser erkennen zu können. Es sollten also nicht so sehr die Absolutwerte betrachtet werden.

Potentialmittelwerte in -mV gegen Cu/CuSO₄ am

Einlauf				Auslauf	
	unbesch.	besch.	geteiltes	unbesch.	besch. Blech
oben	675,6	678,8	686,6	691,4	689,4
unten	678,5	686,8	686,6	693,3	691,9

Bei den ungeteilten Blechen sinkt das Potential mit zunehmender Tiefe wenn auch nur geringfügig ab. Das geteilte Blech zeigt demgegenüber keine Potentialdifferenz zwischen dem oberen und unteren Teilstück. Diese Beobachtung deutet darauf hin, daß an den ungeteilten Blechen ein Großflächenelement besteht, bei dem die anodische Reaktion der Eisenauflösung im oberen Teilbereich wenn auch nur geringfügig größer als über Grund sein müßte, wo die kathodische Reaktion überwiegt. Tatsächlich tritt an den Blechen unter der Wasseroberfläche eine stärkere Korrosion auf als in größerer Tiefe (siehe 7.2).

Bei dem im oberen Bereich durch eine Teerepoxidbeschichtung geschützten Blech am Kühlwassereinlauf findet sich gegenüber dem ungeschützten Blech ein deutlich negativeres Potential. Da beide Bleche sich im gleichen Medium unter gleichen Bedingungen befinden, ist nach dem Strom-Spannungsdiagramm für das beschichtete Blech mit einer geringeren Korrosion zu rechnen, was mit den Abrostungsergebnissen übereinstimmt (siehe 7.2). Die geringste Korrosion am Kühlwassereinlauf ist nach den Potentialwerten an dem geteilten Blech zu erwarten. Hier sollte zudem an allen drei Teilstücken die Abrostung etwa gleich sein. Die Ausmessungen zeigen jedoch ein in etwa gleiches Verhalten wie das ungeteilte Blech.

Am Kühlwasserauslauf, also im wärmeren Wasser liegen die ermittelten Potentiale gegenüber dem Einlauf niedriger. Da die Korrosion, wie später beschrieben, jedoch größer ist, muß sich die Temperatur entscheidend bemerkbar machen. Es ist demnach nicht möglich, in Wasser, das sich durch einen oder mehrere Parameter unterscheidet, durch einfache Potentialausmessungen allein auch nur qualitative Voraussagen über die zu erwartende Korrosion zu machen.

7 Die Bleche

Nach 1, 2, 4 und 6 Jahren Auslagerung wurden die Bleche gezogen und ausgewertet. Auf die Wiedergabe der dabei jeweils gemachten photographischen Aufnahmen vom Oberflächen- bzw. Bewuchszustand der Bleche wird im Rahmen des vorliegenden Berichts abgesehen, da die Reproduktionen nicht sehr aussagekräftig sind.

7.1 Visueller Befund

Der visuelle Befund ist in der folgenden Übersicht kurz skizziert. Sowohl am Kühlwassereinlauf als auch -auslauf findet sich am oberen Ende der

Hein/Klein: Untersuchung über den Temperatureinfluß

		1. Jahr	2. Jahr	4. Jahr	6. Jahr
Einlauf	Wasser- spiegel	80 cm feinnarbiger Rost	70 cm feinnarbiger Rost	70 cm feinnarbiger Rost	70 cm feinnarbiger Rost
		20 cm verschmutzte Oberfläche	30 cm schalig abhebbarer Rost	30 cm starker, blättriger Rost	30 cm starker Rost schalig abhebbar
		20 cm starker Algenbe- wuchs	70 cm starker Muschelbe- wuchs einzelne See- pocken	20 cm Algen	30 cm Röhrenwurm und Muscheln
			40 cm abgestorbener Röh- renwurm		
		120 cm Muscheln gering Röhrenwurm	40 cm vorwiegend Muscheln	440 cm starker Muschel- bewuchs, zum großen Teil abgestorben, zum sehr geringen Teil lebender Röh- renwurm	410 cm starker Muschel- bewuchs
		350 cm starker Bewuchs von Röhrenwurm	310 cm abgestorbener Be- wuchs v. Röhrenwurm, vereinzelt mit Mu- scheln durchsetzt, aber keine Seepocken		
			20 cm rostroter Schmutz	60 cm Schlick	80 cm geringe Menge Röhrenwurm und Schlick
Auslauf	Wasser- spiegel	30 cm Schlickzone schwarzer Belag	40 cm Rostschicht leicht abhebbar		

		1. Jahr	2. Jahr	4. Jahr	6. Jahr
Einlauf	Wasser- spiegel	80 cm feinkörniger Rost	50 cm feinkörniger Rost	70 cm feinkörniger Rost	80 cm feinkörniger Rost
		20 cm narbige Oberfläche Rost schalig ab- hebbar	20 cm grauer Belag leicht abhebbar	30 cm plattenförmig abhebbarer Rost	20 cm Algenbewuchs dicke abhebb. Rostschicht
		40 cm Algenbewuchs z.T. hellroter Rost in	30 cm Algen, dicker Rost	60 cm Seepocken	50 cm Algen mit wenig Muscheln
		100 cm Algen, Muscheln Seepocken	80 cm schwacher Bewuchs von Seepocken und Muscheln	80 cm Seepocken und Muscheln	
		200 cm Muschel- und See- pockenbewuchs; nicht mehr ganz so dicht	210 cm starker Bewuchs von Seepocken und Muscheln	130 cm große Seepocken	310 cm Muscheln mit starkem Bewuchs an Röhrenwurm z.T. sehr hohe Röhren
			40 cm leichter Rost, wenig Bewuchs		
		50 cm im Boden blanker Stahl unter Schutzschicht	60 cm im Schlick geringer Rost	40 cm Schlick	30 cm Schlick geringer Rost

Bleche bis etwa 20 - 30 cm über dem Wasserspiegel festhaftender, feinkörniger Rost. Die folgenden 20 bis 30 cm bis zum Wasserspiegel sind zum Teil mit Algen bewachsen. Auf dem Stahl selbst liegt plattenförmiger, schalig abhebbarer Rost vor. Auch im Bereich kurz unter der Wasseroberfläche war an beiden Ständen teilweise Algenbewuchs anzutreffen. Ansonsten unterschieden sich die beiden Stände in ihrem Bewuchs deutlich voneinander.

Am Kühlwassereinlauf fiel im ersten Jahr am übrigen Unterwasserteil des Bleches ein "korallenartiger" Bewuchs auf, der nur an einem kleinen Stück mit wenig Muscheln durchsetzt war. Es handelte sich dabei um einen Kalkröhrenwurm *Mercierella enigmatica*, dessen Auftreten in einem norddeutschen Hafen zum ersten Mal nachgewiesen wurde /2/. Dieser Bewuchs war im zweiten Jahr jedoch abgestorben. In den Folgejahren wurde dieser dichte Besatz in zunehmendem Maße durch Bewuchs von Muscheln verdrängt. Nach vier Jahren trat der Röhrenwurm wieder auf, allerdings nur an sehr wenigen Stellen. Dieser Besatz nahm zum sechsten Jahr geringfügig zu. Auffallend ist, daß an diesem Stand am Kühlwassereinlauf praktisch keine Seepocken beobachtet wurden.

Am Kühlwasserauslauf fand sich im Unterwasserbereich in den ersten vier Jahren ein z.T. starker Bewuchs an Muscheln und Seepocken. Erst bei der Probenahme im sechsten Jahr wurde ein Auftreten des Röhrenwurms beobachtet. Der stellenweise starke Besatz mit z.T. sehr hohen Röhren war mit Muscheln durchsetzt. Eigenartigerweise fanden sich im Gegensatz zu den vorhergehenden Jahren keine Seepocken mehr.

7.2 Abrostungsprofile

Nach grobem, mechanischem Entfernen des Bewuchses, Schmutzes und lockeren Rostes wurden die Bleche mit einer Trennscheibe in Stücke von 1,5 m Länge zerlegt und zur BAW transportiert. Dabei ist die Schnittbreite mit ca. 4 mm anzusetzen. Die anhaftende Rostschicht wurde soweit wie möglich mit einem Spachtel entfernt und die Bleche in inhibierter Schwefelsäure abgebeizt. Bei diesem Abbeizvorgang löst die Schwefelsäure nur die Oxidschicht bzw. den Rost auf, während das Metall praktisch nicht angegriffen wird.

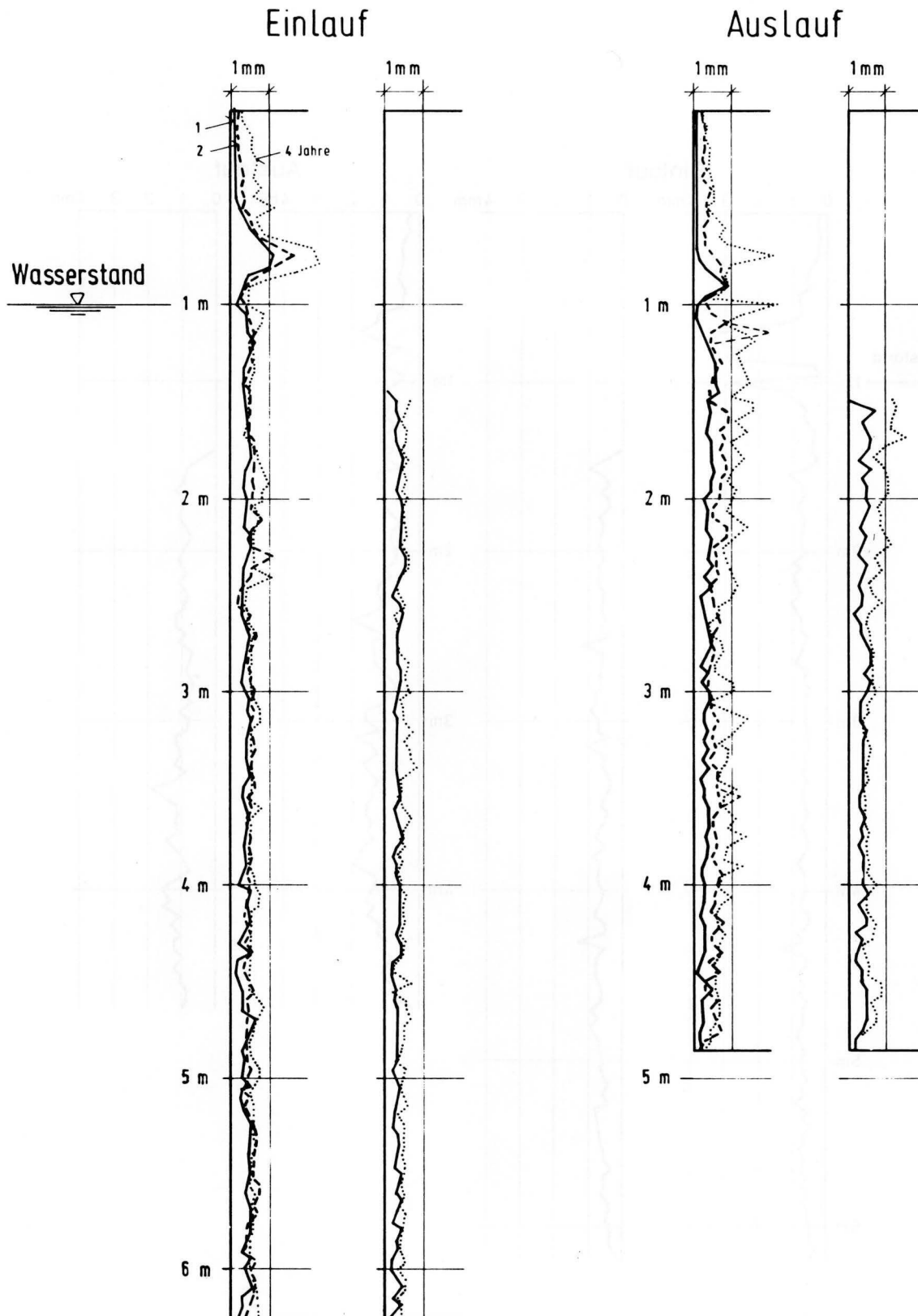


Bild 7 a: Beidseitige Abrostung der Stahlbleche einseitig aufgetragen

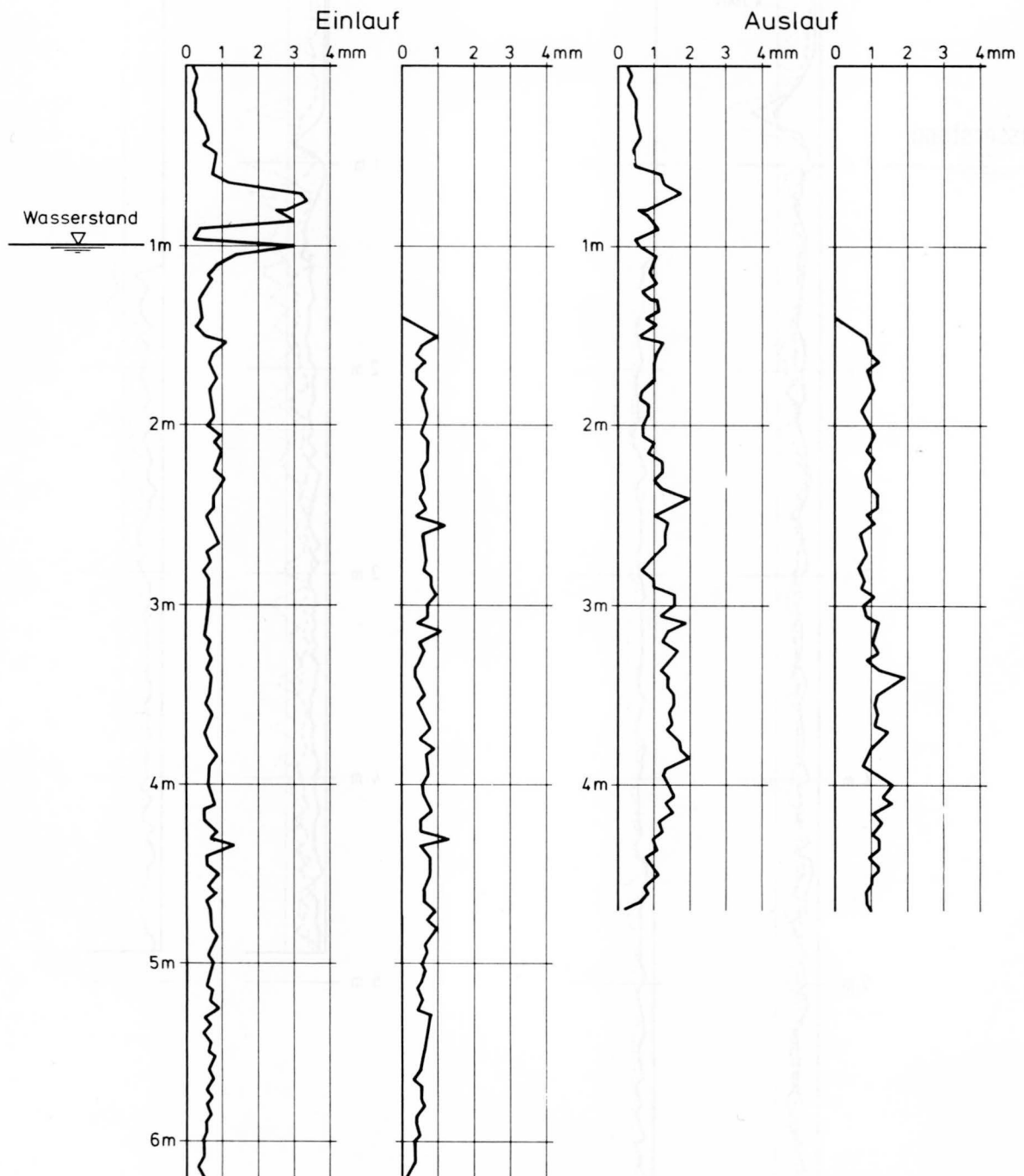


Bild 7 b Beidseitige Abrostung der Stahlbleche nach 6 Jahren, einseitig aufgetragen

Nach dem Beizen, Spülen und Trocknen liegen also Bleche vor, von denen die Korrosionsprodukte des Metalls entfernt sind. Durch Ausmessen mit einer Meßuhr läßt sich das Profil der Bleche ermitteln. Bei der vorliegenden Auswertung wurden dabei über die Länge je cm 2 Messungen durchgeführt. Auf die ausführliche Wiedergabe der erhaltenen Meßwerte wird im Rahmen des vorliegenden Berichtes verzichtet. Die resultierenden Abrostungsprofile, d.h. die beidseitige Abrostung (das vermessene Profil von der Ausgangsstärke subtrahiert) einseitig aufgetragen, sind für die Auswertungen nach 1, 2 und 4 Jahren Auslagerung in Bild 7 a, nach 6 Jahren in Bild 7 b dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung ist die Abrostung vergrößert, die Blechlänge verkleinert wiedergegeben. Bei den beschichteten Blechen tritt eine meßbare Abrostung erst bei 1,50 m von der Blechoberkante auf.

Die Bleche waren so in die Stände eingesetzt worden, daß die Oberkanten, wie in den Bildern eingetragen, sich 1,00 m über dem Wasserspiegel befanden. Der Wasserstand ist im Emdener Hafen jedoch nicht ganz exakt zu halten. Es muß mit einer Schwankung des Wasserspiegels von ca. 10 cm gerechnet werden. Aufgrund der Abrostungsprofile ist davon auszugehen, daß der zeitlich langfristige Wasserstand sich bei etwa 0,95 m gemessen von Blechoberkante befand.

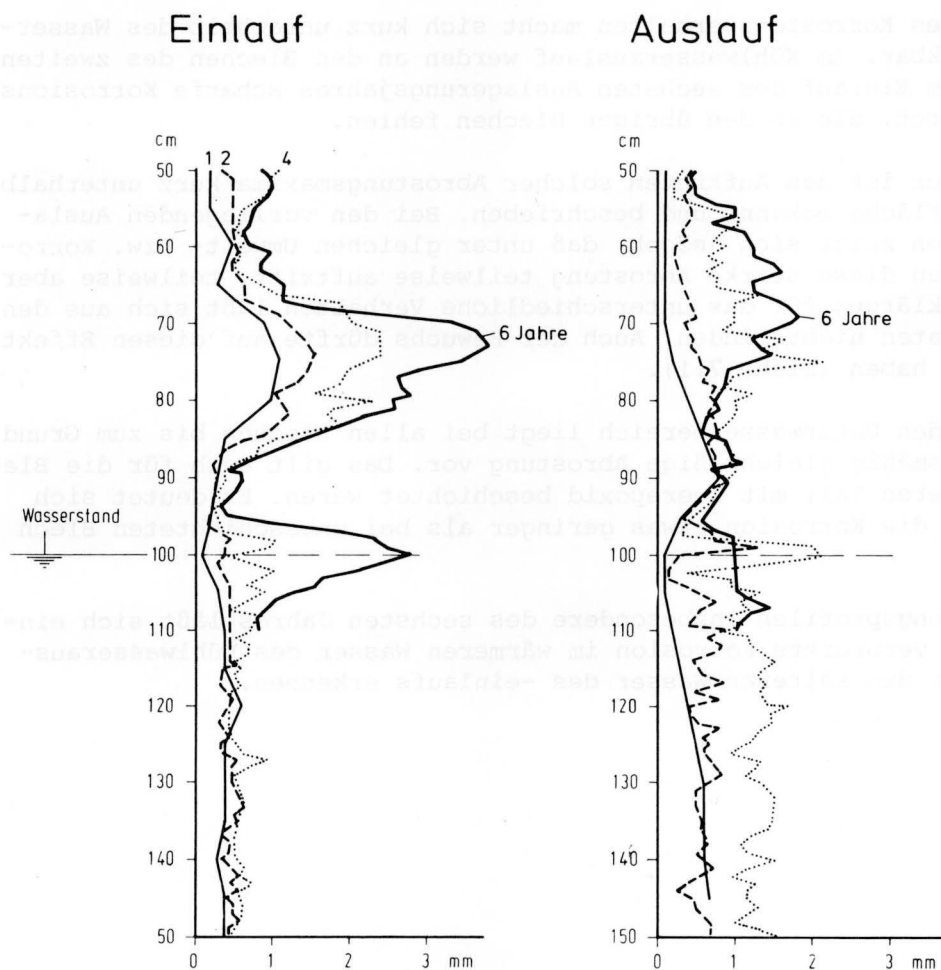


Bild 8 Beidseitige Abrostung der Stahlbleche im Bereich 50 cm über bis 50 cm unter normalem Wasserstand, einseitig aufgetragen.

An den unbeschichteten Blechen ist die stärkste Korrosion im Überwasserbereich und z.T. kurz unterhalb des Wasserspiegels zu beobachten. Zum besseren Vergleich ist in Bild 8 der Bereich von 50 cm oberhalb bis 50 cm unterhalb des Wasserstandes, d.h. von 50 cm bis 150 cm von der Blechoberkante herausgezeichnet. In der Abbildung sind die Abrostungskurven des ersten, zweiten, vierten und sechsten Jahres eingetragen, wobei die Kurven des letzten Jahres nur bis 110 cm ab Blechoberkante reichen, um im tieferen Bereich die Wiedergabe nicht zu unübersichtlich werden zu lassen. Der verhältnismäßig glatte Kurvenverlauf des ersten Jahres ist jedoch vorgetäuscht, da hier nur alle 5 cm Meßpunkte eingetragen wurden, während in den übrigen Jahren das jedes cm erfolgte.

Bei allen Probeblechen findet sich im Überwasserbereich ein Korrosionsmaximum. Auffallend ist die unterschiedliche Form der Abrostung zwischen Kühlwassereinlauf und -auslauf. Am Einlauf zeigt sich jeweils ein relativ eng begrenztes dafür aber tiefes Korrosionsmaximum, das besonders deutlich im sechsten Jahr zu erkennen ist. Demgegenüber findet sich am Auslauf ein breiteres aber flacheres Maximum, das in größerer Entfernung vom Wasserspiegel auftritt als beim Einlauf.

Ein eigenartiges Korrosionsverhalten macht sich kurz unterhalb des Wasserspiegels bemerkbar. Am Kühlwasserauslauf werden an den Blechen des zweiten und vierten, am Einlauf des sechsten Auslagerungsjahres scharfe Korrosionsmaxima beobachtet, die an den übrigen Blechen fehlen.

In der Literatur ist das Auftreten solcher Abrostungsmaxima kurz unterhalb der Wasseroberfläche bekannt und beschrieben. Bei den vorliegenden Auslagerungsversuchen zeigt sich jedoch, daß unter gleichen Umwelt- bzw. Korrosionsbedingungen diese starke Abrostung teilweise auftritt, teilweise aber fehlt. Eine Erklärung für das unterschiedliche Verhalten läßt sich aus den vorliegenden Daten nicht finden. Auch der Bewuchs dürfte auf diesen Effekt keinen Einfluß haben (siehe 7.1).

Im anschließenden Unterwasserbereich liegt bei allen Blechen bis zum Grund eine verhältnismäßig gleichmäßige Abrostung vor. Das gilt auch für die Bleche, die im oberen Teil mit Teerepoxyd beschichtet waren. Es deutet sich jedoch an, daß die Korrosion etwas geringer als bei unbeschichteten Blech ist.

Bei den Abrostungsprofilen insbesondere des sechsten Jahres läßt sich eindrucksvoll die verstärkte Korrosion im wärmeren Wasser des Kühlwasserauslaufs gegenüber dem kälteren Wasser des -einlaufs erkennen.

An beiden Ständen war jeweils ein Blech in drei Stücke unterteilt eingesetzt worden, wobei am Auslauf durch eine Beschädigung des Standes die beiden unteren Teile verloren gingen. Über isoliert angebrachte und im Überwasserbereich kurzgeschlossene Kabel sollte eine gleiche Großflächenkorrosion erhalten werden, wie am ungeteilten Blech. Im großen und ganzen zeigt sich wie aus Bild 9 ersichtlich am geteilten Blech des Kühlwasser-einlaufs tatsächlich ein in etwa gleiches Korrosionsverhalten. Auch hier findet sich ein ausgesprochenes Korrosionsmaximum im Überwasserbereich, eine verstärkte Abrostung kurz unterhalb des Wasserspiegels tritt hingegen nicht auf. Im übrigen Unterwasserbereich des oberen Teilstücks erscheint die Korrosion jedoch deutlich stärker als beim ungeteilten Blech, während sie bei den beiden unteren Teilstücken etwa der des ungeteilten Bleches gleicht.

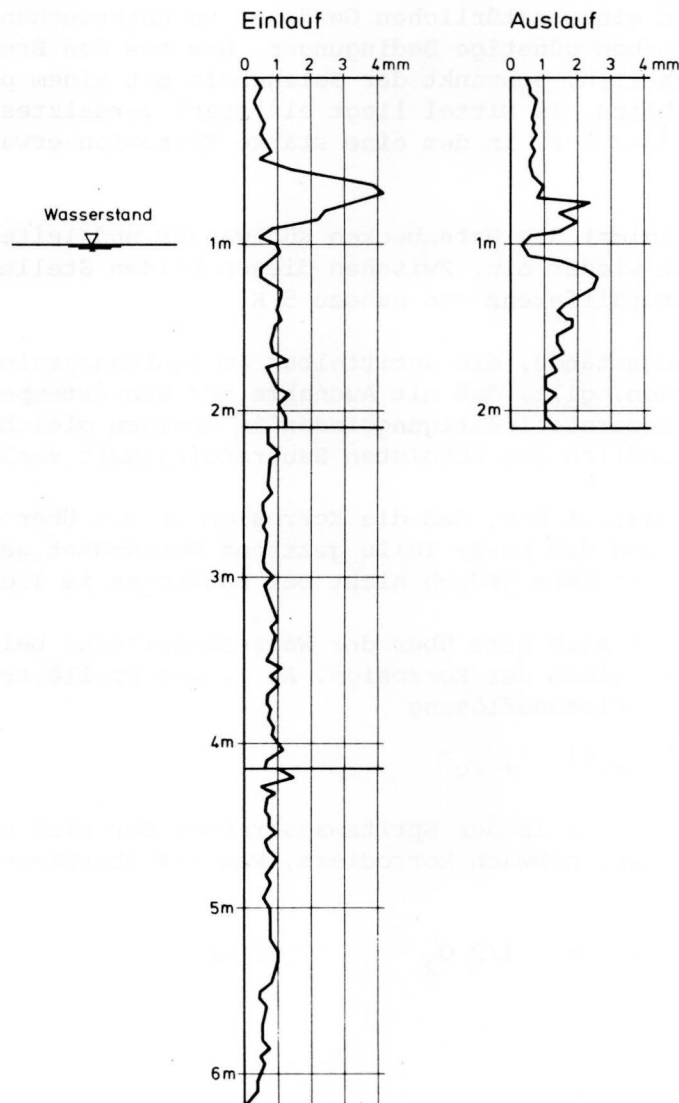


Bild 9 Beidseitige Abrostung der geteilten Stahlbleche nach 6 Jahren, einseitig aufgetragen.

Am verbliebenen oberen Blech des Auslaufs zeigt sich im Überwasserbereich ebenfalls ein Korrosionsmaximum, das in seinem Umfang etwa dem des ungeteilten Bleches entspricht. Im Unterwasserbereich läßt sich nicht klar entscheiden, ob auch hier ein Maximum auftritt oder ob, was aber deutlich erkennbar ist, allgemein über die ganze Länge des Teilstücks eine stärkere Abrostung vorliegt als beim ungeteilten Blech.

8 Diskussion der Ergebnisse

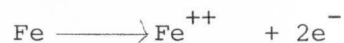
Für die gestellte Aufgabe, den Einfluß der Temperatur auf die Korrosion von ungeschütztem Baustahl in einem natürlichen Gewässer zu untersuchen, bot der Emdener Hafen ausgesprochen günstige Bedingungen. Wie aus den Ergebnissen der Wasseranalysen ersichtlich, schwankt der Salzgehalt mit einem praktisch jährlichen Rhythmus erheblich. Im Mittel liegt ein stark versalztes Flußwasser mit etwa 10 ‰ Salz vor, in dem eine starke Korrosion erwartet werden konnte.

Ein Kraftwerk der NWK entnimmt dem Hafenbecken Kühlwasser und leitet es an anderer Stelle aufgewärmt wieder ein. Zwischen diesen beiden Stellen im Hafen besteht eine Temperaturdifferenz von nahezu 5 K.

Für die beiden Auslagerungsstände, die unmittelbar am Kühlwassereinlauf bzw. -auslauf installiert wurden, gilt, daß mit Ausnahme der Wassertemperatur und dadurch bedingt dem Sauerstoffsättigungsindex im übrigen gleiche Korrosionsbedingungen einschließlich dem absoluten Sauerstoffgehalt vorliegen.

Die Beobachtungen deuten darauf hin, daß die Korrosion in die Über- und Unterwasserzone eingeteilt und daß beide Teile getrennt betrachtet werden können. - Das gilt in dieser Form jedoch nicht bei Bauwerken im Tidebereich -

Im Überwasserbereich findet sich kurz über der Wasseroberfläche bei allen untersuchten Blechen ein Maximum der Korrosion. An dieser Stelle tritt also die anodische Reaktion der Eisenauflösung



stärker ein als weiter entfernt in der Spritzwasserzone. Der sich nach oben anschließende Bereich ist nur schwach korrodiert, was auf überwiegende kathodische Reaktion



hinweist.

Anders ausgedrückt liegt im untersuchten oberen Bereich der Bleche ein leichter Feuchtigkeitsfilm an, in dem die kathodische Reaktion des Elektronenverbrauchs abläuft, der aber nur in beschränktem Maße befähigt ist, die bei der anodischen Reaktion auftretenden Eisenionen abzuführen. Hingegen wird kurz oberhalb des Wasserstandes durch die Wellenbewegung immer neues, sauerstoffreiches Wasser herangeführt, so daß austretende Eisenionen schnell entfernt werden. Daher ist auch hier eine verhältnismäßig starke Korrosion mit einem Maximum zu finden, da durch die elektrische Leitfähigkeit des Metalls bedingt für die resultierende kathodische Reaktion eine größere Fläche zur Verfügung steht, die alle erzeugten Elektronen abführen kann.

Bei der vorliegenden Anordnung scheint für den Bereich maximaler Korrosion daher nicht der sauerstoffabhängige kathodische, sondern der metalllösende, anodische Reaktionsschritt geschwindigkeitsbestimmend zu sein.

Auffallend ist allerdings, daß am Kühlwasserauslauf also bei erhöhter Temperatur die Abrostung deutlich geringer ist als am kühleren -einlauf. Eine Erklärung läßt sich aus den vorliegenden Daten nicht finden.

Beide Auslagerungsstände befinden sich in der Nähe des Abschlusses von nach Westen offenen Hafenbecken unterschiedlicher Ausdehnung und auch unterschiedlichem Schiffverkehr. Es kann daher nur vermutet werden, daß bei der Ausbildung der Korrosionsmaxima eine unterschiedliche Wellenhöhe und -häufigkeit eine Rolle spielt.

Unterschiedlich verhalten sich die Bleche in Höhe bzw. kurz unterhalb des Wasserspiegels. Sowohl am Kühlwassereinlauf als auch -auslauf weisen einige Bleche auch in diesem Bereich ein ausgeprägtes Korrosionsmaximum auf, andere Bleche hingegen zeigen keine verstärkte Abrostung. Das angeführte Korrosionsmaximum kurz unterhalb des Wasserspiegels ist eine in der Natur oft vorkommende und beobachtete, in der Literatur beschriebene Erscheinung. Die verstärkte Abrostung wird allgemein mit der Belüftungszone in Zusammenhang gebracht bzw. erklärt. D.h. in der Zone kurz unter dem Wasserspiegel wird mit einer erhöhten Sauerstoffkonzentration, hervorgerufen durch Wellenbewegung, Diffusion usw., gerechnet, durch die die verstärkte Abrostung entsteht.

Da bei den vorliegenden Auslagerungsversuchen, wie bereits erwähnt, jedoch nur bei einem Teil der Bleche ein Korrosionsmaximum auftritt, auf die Bleche eines Standes aber praktisch gleiche Umweltbedingungen einwirken, kann die dafür verantwortlich gemachte Belüftungszone wohl eine notwendige, aber nicht hinreichende Korrosionsbedingung sein.

Im anschließenden Unterwasserbereich kann die Abrostung über die ganze Länge der Bleche als gleichförmig angesehen werden, wenngleich insbesondere der untere Teil des Bleches des sechsten Jahres am Auslauf ein stärker narbenartiges Aussehen aufweist.

In Bild 10 ist über die sechs Auslagerungsjahre die mittlere Abrostung im Unterwasserbereich aufgetragen. Dabei wurden die Meßwerte von 1,25 m ab Oberkante Blech, d.h. 25 cm unter Wasserspiegel, bis 4,50 berücksichtigt. Während im ersten Jahr etwa gleiche Abrostungen festzustellen sind, liegt in den folgenden Jahren am Kühlwasserauslauf, d.h. im wärmeren Wasser, eine merklich stärkere Abtragung vor.

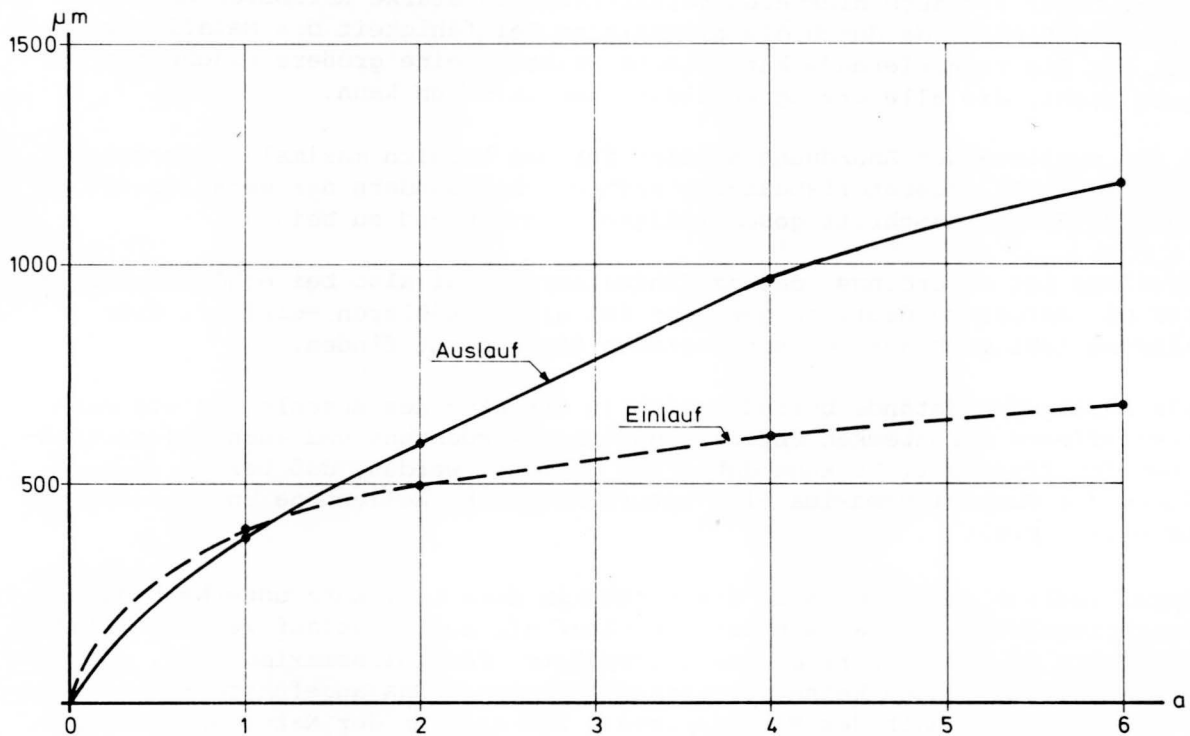


Bild 10: Mittlere Abrostung der Bleche im Unterwasserbereich in μm .

Errechnet man für die verhältnismäßig kurze Zeit von sechs Jahren die Korrosionsraten, d.h. die Gesamtkorrosion dividiert durch die Jahre, so ergibt sich eine Abrostung für den

Einlauf	von	0,11 mm/Jahr
Auslauf	von	0,20 mm/Jahr

Nach Bild 10 wird sich zu längeren Auslagerungszeiten für beide Stände der Kurvenverlauf weiter abflachen, so daß sich die jährliche Korrosionsrate verringert. Qualitativ läßt sich aber erwarten, daß die Abrostung am Auslauf etwa doppelt so groß ist wie am Einlauf.

Wie vorhergehend beschrieben, ist bei einem ungeschützten Stahl in der Überwasserzone bzw. kurz unter dem Wasserspiegel mit der stärksten Korrosion zu rechnen. Aus diesem Grunde wurden bei den Auslagerungsversuchen zusätzlich Bleche eingesetzt, die im Überwasserbereich bis 50 cm unter dem Wasserspiegel mit Teerepoxid beschichtet waren. Abgesehen von diesem Bereich zeigte sich, daß die Korrosion im übrigen Unterwasserteil zwar gering aber doch deutlich niedriger lag als beim ungeschützten Blech.

Während im ersten Jahr dieser Unterschied noch nicht merklich war - im zweiten Jahr wurden keine beschichteten Bleche gezogen - ergab sich im Bereich von 1,65 bis 4,50 m ab Oberkante Bleche nach

4 Jahren		6 Jahren	
für das ungeschützte	geschützte	ungeschützte	geschützte Blech
am Einlauf 0,62 mm	0,51 mm	0,70 mm	0,65 mm
am Auslauf 0,91 mm	0,70 mm	1,22 mm	1,03 mm

mittlere Abrostung.

Kurz erwähnt sei nur noch einmal, daß sich aus einfachen Ausmessungen des anliegenden Potentials (Ruhepotential) keine Rückschlüsse auf das Korrosionsverhalten des Stahls im Unterwasserbereich ziehen lassen.

9 Schlußbetrachtung

Durch den steigenden Energiebedarf wird den Flüssen und Wasserstraßen in immer größerem Umfang Kühlwasser entnommen und dieses aufgeheizt zurückgegeben. Neben den Fragen der Ökologie, die in diesem Zusammenhang nicht behandelt werden, ist von Interesse, ob und wie sich eine erhöhte Temperatur auf die Korrosion von Stahlbauteilen auswirkt.

Für die vorgesehenen Untersuchungen bot sich der Emden Hafen an, in dem ein stark versalztes Flußbrackwasser (mesohaline Zone) vorliegt und in dem zwischen zwei extremen Stellen, nämlich Kühlwassereinlauf und -auslauf eines Kraftwerkes der NWK, eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von etwa 5 K herrscht.

In salzhaltigem Wasser korrodiert Stahl je nach Konzentration z.T. wesentlich stärker als im Süßwasser der Flüsse bzw. Wasserstraßen, was sich bei Naturversuchen für die Messungen von Abrostungsprofilen als günstig erweist.

Aus den durchgeführten Auslagerungsversuchen ergibt sich, wie erwartet, daß im Unterwasserbereich im wärmeren Wasser unter sonst gleichen Umweltbedingungen die Korrosion sich verstärkt. Bei den vorliegenden Versuchen ist bei einer Temperaturdifferenz von ca. 5 K über 6 Jahre gemessen mit einer Verdoppelung der jährlichen Korrosionsrate zu rechnen.

Die weitaus stärkste Abrostung findet sich jedoch in der Überwasserzone. Hier ist die Korrosion aber nach den vorliegenden Ergebnissen offensichtlich unabhängig von der Temperatur des Wassers, zumindest bei der vorliegenden Differenz von 5 K.

Bei Beschichtung des oberen Teils eines Bauteiles bis etwa 50 cm unter den Wasserspiegel z.B. mit Teerepoxyd wird nicht nur die starke Abrostung in der Überwasserzone und evtl. kurz unter dem Wasserspiegel verhindert, sondern auch die Korrosion im übrigen Unterwasserbereich geringfügig abgeschwächt. Aber auch hier zeigt sich, daß ähnlich wie bei den ungeschützten Proben sich die Korrosion im 5 K wärmeren Wasser nach sechsjähriger Auslagerung etwa verdoppelt hat.

Für die angeführte Fragestellung ergibt sich aus den Untersuchungen, daß z.B. an ungeschützten Spundbohlen die Aufwärmung des Wassers für die Stellen stärkster Korrosion, die im Überwasserbereich liegen, keine Rolle spielt. Hierbei sei aber bemerkt, daß diese Stellen im allgemeinen nicht im Bereich starker statischer Beanspruchung liegen.

Die Korrosion im Unterwasserbereich wird hingegen von der Temperatur beeinflusst bzw. mit steigender Temperatur deutlich verstärkt.

10 Schlußfolgerungen

Hieraus ergeben sich aus unserer Sicht folgende Schlußfolgerungen:

1. Künstliche Erwärmung des Wassers führt in korrosionsgefährdeten Bereichen (Brackwasser, Seewasser) zu erheblich beschleunigten Korrosionsschäden an ungeschützten Stahlwasserbauten. Im vorliegenden untersuchten Fall verdoppelte sich mit einer Aufwärmung um 5 K die durchschnittliche jährliche Korrosionsrate.
2. Diese Schädigung durch Abwärmeeinleitung erlangt für die Standsicherheit eines Stahlbauwerks jedoch nur dann Bedeutung, wenn im stark gefährdeten Bereich kurz oberhalb des Wasserspiegels die dort nicht abwärmebedingte Korrosion durch einen ausreichenden, passiven Korrosionsschutz verhindert wird.
3. Soweit in Fällen, die 2. entsprechen, Korrosion die Standzeit oder Gebrauchsdauer von Stahlwasserbauten begrenzt, entsteht durch Abwärmeeinleitungen ein nachweisbarer und ggf. im Einzelfall meßbarer Schaden an öffentlichem Eigentum.

11 Literatur

- | | | |
|-----|---|---|
| /1/ | Ausschuß für
Korrosionsfragen
der HTG | Untersuchungen über das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl in Hafenwässern des deutschen Küstengebietes. Sonderdruck 1975. |
| /2/ | Kühl, H.: | Mercierella enigmatica an der deutschen Nordseeküste.
Veröfftl. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven.
(1977) 16 S. 99 - 104. |

GESAMT-INHALTS-ÜBERSICHT

der bisher erschienenen Hefte des Mitteilungsblattes der Bundesanstalt für Wasserbau

Nr./Jahr	Verfasser	T i t e l
1/53	Jambor Burghart Türk Zweck Canisius Liebs Schleiermacher Boos	Erhöhung d.festen Wehrschwelle bei gleicher hydraul. Leistung Die Verteilung der Abflußmenge über den Querschnitt Untersuch. ü.d. Geschiebebeweg. in Flüssen u. Stauanl. D.el.-akust.Verf. Flach- und Pfahlgründungen in weichem tonigem Schluff Aus der Arbeit der Bundesanstalt Ausbau der Unteren Hunte Sicherung d.Schiffahrtsrinne in d.Donau im Bereich d.Innmündung.... Vom wasserbaulichen Versuchswesen in England
2/53	Canisius Pichl Burghart/Gehrig Davidenkoff Sagawe Zweck	Technische Entwicklung im Wasserbau Der Ortungstachygraph und seine Anwendung Beitrag zur Frage d.Geschwindigkeitsverteilung in offenen Gerinnen Grundwasserzufluss zu Brunnen und Gräben Der Dehnungsmeßstreifen als Meßelement b.erd-u.wasserbaul.Modellversuchen Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (I)
3/54	Canisius Wehrkamp Liebs Schleiermacher Zweck Meenen	Die Bodenmechanik im Dienste des Wasserbaues Ein neues Flußprofilmeßgerät Abzweigung einer verhältnismäßig Teilwassermenge an einem Meßwehr Gestaltung schräg angeströmter Brückenpfeiler Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (II) Reiseeindrücke von einem Einsatz der Bundesanstalt in Venezuela
4/54	Jambor Herr Wehrkamp Davidenkoff Zweck	Die Gestaltung v.Kanalabzweig. unter bes.Berücks.v.Schwingungen im Kanal Spülvermögen b.Verschlamm.u.Geschiebeablager.in einem Wehrfeld mit höckerartig erhöhter Wehrschwelle Das Flußprofilzeichengerät von Dr. Fahrentholz Gefährdung der Stauwerke bei Unterströmung Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (III)
5/55	Canisius Niebuhr Schleiermacher Gehrig Poggensee Zweck/Davidenkoff	Die Bundesanst.f.Wasserbau. Ein Rückblick auf ihre Entwickl.1948-1955 Kritische Betrachtungen zur Frage der Modellrauhigkeit (I) Wasserspiegelaufnahmen in Flußkrümmungen u.Wasserspiegelquergefälle Überprüfung hydrographischer Angaben durch den Modellversuch Die Grundformel zur Bestimmung der Schleusenleistung Die versuchstechn.Verf.z.Berechn.d.Netzes ein.Grundwasserströmung
6/56	Schleiermacher Gehrig Wigand Zweck/Davidenkoff Poggensee	Geschwindigk.Verlager.i.Querschn.mittels Buhnen oder Leitwerken Messung und Berechnung von Kräften an Schiffen im Modell Verhinder.v.Geschiebeablager.vor d.unt.Schleusenvorhöfen v.Staustufen Über die Zusammensetzung von Filtern Anwendung und Kritik von Rammformeln
7/56	Gehrig Zweck/Davidenkoff Schleiermacher Niebuhr Davidenkoff Liebs Jambor	Strömungsmessung mit einem Kreiszyylinder Untersuch.v.Sicherungsmaßnahmen an Flußdeichen durch Modellversuche Einfache Darstell.d.zeitl.Ablaufes v.Anschwellungen in Wasserläufen/Tidegeb. Beitr.z.Erfass.d.Räumkraft ein.ungl.förm.Ström.unt.bes.Berücks.d.Verhält.i. Angenäh.Ermittl.d.Grundw.Zufl. zu ein.in ein.durchl.Boden ausgehob.Grube Abflußbeiwerte μ für grasbewachsene Deiche Formgebung des Trennpfeilers in Flußkraftwerken
8/57	Yalin Davidenkoff	Die theoretische Analyse der Mechanik der Geschiebebewegung Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (I)
9/57	Zweck/Davidenkoff Davidenkoff Schleiermacher Yalin	Auftrieb unter Wehren auf durchlässigem Untergrund Wirkung der Sickerströmung auf d.Standsicherheit eines Erddammes (II) Vers.ein.morphol.Begründ.v.Rauhigk.beiwert.f.d.Berechn.d.Wassersp.gefälles Ermittlung des Querschnittes mit maximalem Geschiebetransportvermögen
10/58	Magens	Unters.d.Ursachen und des Vorganges d.Verschlickung der Schleusenvor- höfen zu Brunsbüttelkoog
11/58	Rubbert Gruhle Gehrig Davidenkoff	Die Vertiefung der Tideflüsse und ihre Problematik Verformungsmessungen an den Spundwänden der Schleuse Friedrichsfeld Der Verbau von Übertiefen und die Erhaltung des Fahrwassers Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (Schluss aus 8 und 9)
12/59	Zweck/Dietrich Zweck Rubbert	Zur Ermittlung der Verteilung des Coulomb'schen Erddruckes Versuchsergebnisse über die Zusammensetzung von Filtern Die Tiderechnung als Problem der Numerischen Analysis
13/59	Zweck/Dietrich Felkel Steinfeld	Die Berechnung verankerter Spundwände in nicht bindigen Böden nach ROWE Der Schwellbetrieb der Flußkraftwerke Über den Erddruck an Schacht- und Brunnenwandungen
14/60	Felkel Davidenkoff Gehrig/Herr	Walzenbucht u.Ringgraben als Mittel z.Verminder.d.Schwebstrablager.in Fluß- Neue Forschungsarb.ü.d.Konsolidierung wassergesättigter bindiger Böden Beitrag zur Ermittlung des Wasserdruckes auf gekrümmte Flächen
15/60	Jambor Felkel Felkel	Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten Wasserspiegelmessungen an einer festen Wehrschwelle Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs
16/61	Felkel Davidenkoff Dietrich	Die Modelluntersuchungen für zehn Moselstaustufen Sickerverluste bei Durch- und Unterströmung von Deichen Schnittgrö. u.Randspann.i.d.Sohlufuge ein.Kai-od.Stützmauer v.rechteck.Quer- schnitt
17/62	Kleinschmidt/Schröder	Sonderheft Korrosionsversuche
18/62	Felkel Vollmer Felkel Davidenkoff	Der Einsatz frei fahrender Modellschiffe beim flußbaulichen Versuch Erfahr. an ein.Tidemodell m.bewegl.Sohle u.Vergl.zw.Modell-u.Naturmessungen Ein einf.Rundbecken z.Mischen v.Wasser u.Koagulieren v.Schmutzstoffen Über die Berechnung der Sickerverluste aus Kanälen
19/63	Zweck/Dietrich Jansen Felkel Jänke	Modellvers.m.steifen Dalben in bind.Böden bei plötzl.Belastung Die Neukonstruktion v.Fahrstühlen f.Kr.-ftmessungen an Modellschiffen Die Neckartalplanung im Raume Heilbronn Überprüfung der Brauchbarkeit von Pfahlformeln anhand von Probelastungen und Messungen an Stahlpfählen
20/64	Franke	Die Strömungsvorgänge bei unvollkommenen Brunnen

Nr./Jahr	Verfasser	T i t e l
21/64	Naujoks Dietrich Liebs Franke	Untersuchungen zum Nachweis eines spezifischen Sättigungsgrades Zur Berechnung der Tragfähigkeit starrer Dalben in homogenen Böden Die Abschirmung von Seehäfen gegen Seegang D.Einfl.d.Neig.winkels d.wasserführ.Schicht u.einer partiell.Auskleid.des durchläss.Brunnenschachtes auf d.Zuflußmenge zu einem artes.Brunnen
22/65	Rubbert Jambor Davidenkoff/Franke	Tidewellenberechn.nach d.Universalprogr.d.BAW "...Oberelbe" Schutz der Sohle in Flüssen Unters.d.räuml.Sickerström.in eine umspund.Baugrube in offen.Gewässern
23/66	Dietrich Ruck Dietz Felkel/Canisius	Modellvers.m.biegsamen langen Dalben unt.wiederh.Belast.im Sand Untersuchung d.Sandwanderungsverhältnisse im Küstenber.zw.Stohl u.Brauner Berg Einfl.d.Saugschl.beaufschlag.b.Kaplanturbin.auf d.Schiff.-verhältnisse... Elektronische Berechnung von Wasserspiegellagen
24/66	Völpel/Samu Schnoor Zweck Davidenkoff/Franke	Reliefänderungen i.d.Tidestromrinne des Wangerooger Fahrwassers... Ü.neue Verfahr.z.Berechn.d.Reflexionsdr.v.Wasserwellen auf senkr.Wände Baugrunduntersuch. m.Sonden gem.DIN 4094 m.Auswertungsmöglichkeiten Räumliche Sickerströmung in eine umspundete Baugrube im Grundwasser
25/67	Schnoor Davidenkoff Franke Schulz/Ruck Lambert	Üb.versch.Verfahr.z.Berechn.d.Wellenangr.Kräfte auf senkr.Pfähle u.Wände Dimensionierung von Brunnenfiltern Die Wirkungen d.Wassers auf d.Standsicherheit von Böschungen Die Sandwanderungsverhältnisse an d.Nordküste d.Insel Fehmarn.... Die Erscheinung der Gezeiten und ihre Erklärung
26/68	Schnoor Samu Ruck	Üb.versch.Verfahr.z.Berechn.d.Wellenangr.Kr.... auf senkr.Pfähle und Wände Ergebnisse der Sandwanderungsuntersuchungen in d.südlichen Nordsee Auswirk.d.geol. Verhältn. im Küstengeb. auf Baumaßn. im Wasserbau
27/68	Schäle/Kuhn/ Schröder/Hofmann	Kanal- und Schifffahrtsversuche Bamberg 1967
28/69	Jänke Felkel	Untersuch.d.Zusammendrückbark.u.Scherfestigk.v.Sanden u.Kiesen... Der Weg zum vollständigen mathematischen Flußmodell
29/69	Dietz Dietz	Kolksicherung durch Befestigungsstrecken für das Eidersiel Kolksicherung am Elbewehr Geesthacht
30/70	Franke/Manzke Franke Felkel Jurisch Sindern/Rohde Harten Dietz	Zwei interessante Beisp.von den Erdbauaufgaben am Elbe-Seitenkanal Einige Beispiele zur Strömungsdruckwirkung des Grundwassers Ideestudie ü.d.d.Möglichk.d.Verhüt.v.Sohlenerosion. durch Geschiebezufuhr... Beitrag zur Verwendung von Durchflußgleichungen b.Dreieck-Überfällen. Zur Vorgeschichte der Abdämmung der Eider... Abdämmung der Eider; Modellversuche im Tidemodell Abdämmung der Eider; Modellversuche für das Sielbauwerk
31/72	Giese/Teichert/ Vollmers Dorer Dietz Dietz	Das Tideregime der Elbe - Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle Berechn.d.nichtstationären Abfl.in nicht-prismat.offenen Gerinnen Ausbildung von langen Pfeilern bei Schräganströmung... Systematische Modellversuche über die Pfeilerkolkbildung
32/72	Niebuhr Ache Franke/Ache Franke/Garbrecht/ Kiebusch Franke/Bernhard Felkel Giese	Einfluß d.Seitenwände bei hydraul. Versuchen in ein.rechteck.Glasrinne Ergebnisse v.Sondierungen neben einem eingespülten Gründungskörper... Ein Verfahren z.Berechn.eingespannter gedrungener Gründungskörper Meßfehler infolge unvollk.Volumenkonstanz v. Porenwasserdruckgebern beim Scherversuch Erddruckansatz b.trogförm.Bauwerken u.Wechselwirk.zw.Erd-u.Sohldruck... Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg und Bingen Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe
33/72	Rohde/Meyn Ruck Dietz Hein	Untersuch.üb.d.hydrodyn.Verhalt.oberfl.markiert.Sandes u.ü.d.Einbringemeth. Erfahrungen beim Präparieren von Sand für Leitstoffuntersuchungen Kolksicherung am Störsperrwerk Verhalten von Rost unter nicht absolut dichten Beschichtungen bei Anlegen von kathodischem Schutz im Stahlwasserbau
34/73	Hovers	Der Einfluß von Strombauwerken auf die morphologische Entwicklung der Stromrinnen im Mündungsgebiet eines Tideflusses, untersucht am Beispiel der Außenweser
35/73	Davidenkoff Tödtgen Hein Jurisch Pulina Dietz List	Anwendung von Bodenfiltern im Wasserbau Beitrag zur Energiedissipation von Tosbecken im Modellversuch Sulfatangriff des Meerwassers auf Beton? Messung der Momentangeschwindigkeiten mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie Geschwindigkeitsmessungen an einer Bootsgasse Modelluntersuchung der Schleusenvorhöfen an der Rheinstaustufe Iffezheim Untersuchung von instationär belasteten Kunststoff-Filtern für den Wasserbau
36/74	Dietz Felkel Dietz/Pulina	Hydraulische Probleme bei der Planung von Staustufen Modellversuche mit Grundschwellen und Schifffahrt Wahl der Wehrverschlüsse beim Ausbau der Saar zur Schifffahrtsstraße
37/75	Tödtgen Schuppener Harten/Knieß Dietz	Untersuchung der Strömungsvorgänge an Buhnen Erddruckmessungen am Schiffshebewerk Lüneburg Eiderdamm - Natur- und Modellmessungen Wellenmessungen im Hafen Travemünde - Vergleich zwischen Natur und Modell
38/75	Schuppener Felkel Samu	Der Erddruck einer rolligen Hinterfüllung auf eine unverschiebbliche Stützwand infolge der Verdichtung Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Sohle des Oberrheins Beitrag zur morphologischen Entwicklung der Außenjade
39/76	Dietz/Pulina	Modelluntersuchungen zur Gestaltung der Hauptbauwerke an der Rheinstaustufe Iffezheim
40/76	Dietz/Pulina Knieß Annuß/Dehm/ Hein/Schröder Dietz/Pulina Dietz	Zur Wahl des Zugsegmentes als Wehrverschluß beim Ausbau der Saar Eiderdamm - Wiederauffüllung von Baggerlöchern im Watt Korrosion an Spundwänden - Wand-Dickenmessungen mit Ultraschall " " " Zur Problematik der Querströmungen in Vorhafenzufahrten und ihre Untersuchung im Modell Zur Frage der Nachbildung von Kolkvorgängen im Modell

Nr./Jahr	Verfasser	T i t e l
41/77	Armbruster Döscher Feddersen Franke/Garbrecht Franke/Schuppener Hauß Kiekbusch Ruck Sagawe Schulz	Vergleich berechneter und gemessener Grundwasserstände am Beispiel Kehl Die Suspensionswand Querbelastete Verankerungen Drei Serien von Probelastungen an Großbohrpfählen in Sand - Ziel - Methode - Besonderheiten b.Gründungsgutachten f.ein flachgegründetes off-shore-Bauwerk Beispiele für die Anwendung statistischer Methoden in der Bodenmechanik Elektrisches Messen von Volumenänderungen beim Triaxialversuch Sondierungen zur Erkundung unterh.d.Gewässersohle von schwimmd.Arbeitsplattform Kraft- und Spannungsmessungen an der Containerkaje in Bremerhaven Überlegungen zur Führung des Nachweises der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge
42/77	Hein Knieß Hein	Untersuchung ü.d. Korrosionsablauf an wetterfesten Stählen i.Abhängigk.v.d. Entfernung z.Meer Bemessung von Schüttstein-Deckwerken im Verkehrswasserbau; Teil I: Lose Steinschüttungen Zum Korrosionsverhalten von Zink in salzhaltigen Wässern
43/78	Dietz Knieß	Strömungsabweiser u./o. durchbrochene Trennmole als Mittel z. Verminderung d.Querströmungen in oberen Vorhafenzufahrten am Beispiel d. neuen Mainstaustufe Krotzenburg. 29 Bilder Belastungen d.Böschungen des NOK durch Schiffsverkehr-Ergebnisse v.Naturmessungen-27Bild.,13 Tab.
44/79	Pulina Jurisch	Modelluntersuchungen für die Saarstaustufe Rehlingen Untersuchungen über die Abflußverhältnisse im Bereich einer Grundschwelle
45/79	Dietz/Pulina Dorer/Siem Hou Lie	Zur Frage des Wehrschwellenprofils beim Zugsegment Schwall- und Sunkberechnungen mit impliziten Differenzenverfahren
46/80	Garbrecht Liebig Franke Armbruster	Auswertung von Setzungsmessungen - zwei Beispiele - Stabilitätsuntersuchungen v.Mehrfachregelkreisen an hydraul.Modellen im wasserbaul.Versuchswesen Studie z.Frage d.Einfl. v. Meereswellen a.d.Größe des Schwallwasserdr.unter Offshore-Flachgründung. Die Sickerwasserströmung i.Ber.d.Stauanl.Kulturwehr Kehl-Teil I: Unterströmng.u.Standsicherh.i. Endzustand
47/80	Felkel	Die Geschiebezugabe als flußbaul. Lösung des Erosionsproblems des Oberrheins
48/80	Giese Schulz/Feddersen/ Weichert	Das Tideregime der Elbe - Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle Zwängungskräfte infolge Sohlreibung
49/81	Pulina/Voigt	Hydrodynamische Belastung der Wehrverschlüsse an den Saarstufen Rehlingen, Mettlach und Scho- den sowie Abflußleistung bei spezifischen Betriebsfällen - Modelluntersuchungen
50/81	Schulz Gehrig Knieß Wulzinger	Zur Festigkeit überverdichteter Tone Die Berechnung des Geschiebetriebanfanges Schütten von Steinen unter Wasser Sedimenttransport und Sohlausbildung im Tidemodell d.Elbe m.bewegl. Sohle
51/82	Pulina/Voigt Kemnitz Hein/Klein	Einfluß der Randbedingungen auf die Abflußleistung unterströmter Wehrverschlüsse Beitrag zur Verringerung der Quergeschwindigkeiten im unteren Schleusenvorhafen einer Staustufe Untersuchung über den Temperatureinfluß auf das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl im Emden Hafenwasser

